

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СТЕЛЬМАХ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.362.3

ДИСЕРТАЦІЯ

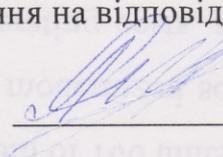
**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ СИПКИХ
СЕРЕДОВИЩ НА РЕШЕТАХ З ОБ'ЄМНОЮ СТРУКТУРОЮ**

133 - Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


А.М. Стельмах

Науковий керівник:

Харченко Сергій Олександрович

доктор технічних наук, доцент

СУМИ – 2026

АНОТАЦІЯ

Стельмах А.М. Обґрунтування параметрів процесу сепарування сипких середовищ на решетах з об'ємною структурою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності процесу сепарування сипких зернових матеріалів (СЗМ) шляхом обґрунтування параметрів перфорованих просіювальних поверхонь (ППП) об'ємної структури. Рішення цього завдання допоможе підвищити технологічну ефективність та надійність сепарувального обладнання, що покращує продовольчу безпеку та є актуальним для України.

Об'єкт дослідження – процес сепарування СЗМ, його зв'язок з конструктивними параметрами ППП.

Предмет дослідження – закономірності динаміки СЗМ та надійності ППП, обґрунтування параметрів ППП об'ємної структури, що забезпечують необхідну продуктивність та довговічність ППП сепарувального обладнання.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності процесу сепарування сипких зернових матеріалів очищення шляхом обґрунтування параметрів розроблених перфорованих просіювальних поверхонь з об'ємною структурою.

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналіз та визначити перспективні способи підвищення ефективності процесу решетного сепарування СЗМ;
2. Виконати аналітичне та експериментальне визначення складових швидкості компонентів СЗМ на розроблених ППП з ОЕ, встановити закономірності зміни ефективності процесу сепарування з урахуванням

властивостей компонентів СЗМ, конструктивно-кінематичних та технологічних параметрів ППП;

3. Виконати комплексне обґрунтування конструктивних параметрів ППП з ОЕ з урахуванням кінематичних режимів роботи, питомих завантажень, фізико-механічних властивостей СЗМ;

4. розробити, виготовити та провести порівняльні із базовими виробничі випробування розроблених ППП з ОЕ, визначити техніко-економічну ефективність їх застосування, впровадити їх в серійне виробництво.

У вступі обґрунтований вибір теми дисертації та наукових завдань, сформульовані мета й завдання дослідження, визначені наукова новизна й практичне значення одержаних результатів, а також наведена інформація про апробацію, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено системний аналіз сучасного стану процесів сепарування СЗМ і встановлено основні чинники, що визначають їх ефективність. Виявлено, що обмеження продуктивності пов'язані з недосконалістю конструкцій ППП, а перспективним напрямком підвищення технологічної ефективності є інтенсифікація внутрішньосферного руху проходових компонентів за рахунок застосування додаткових об'ємних елементів (ОЕ), що формують об'ємну структуру. Застосування подібних структурних ППП сприяє покращенню умов сегрегації, активізує просіювання компонентів та інтенсифікує процес сепарування СЗМ в цілому без істотного зростання енерговитрат.

На основі аналізу побудована класифікація конструкцій ППП та сформульовано науково-технічне завдання, визначені показники ефективності процесу сепарування у вигляді критеріїв: продуктивність, повнота поділу та довговічність. Все це дозволило сформулювати мету й завдання для подальших досліджень.

У другому розділі розроблено теоретичну базу моделювання процесів сепарування СЗМ та оцінки надійності ППП. Здійснено порівняльний аналіз класичних і сучасних підходів математичного опису руху СЗМ, включно з

аналітичними, напівемпіричними, DEM- та гідродинамічними моделями. Встановлено, що останній підхід, заснований на рівняннях безперервності та імпульсу Нав'є–Стокса, дозволяє найбільш повно описати колективну динаміку частинок. Його використання забезпечує коректну оцінку параметрів тиску, швидкості та густини шару СЗМ під дією вібраційної ППП.

Для підвищення точності моделювання процесу сепарування розроблено узагальнену модель руху СЗМ на плоскій ППП з об'ємною структурою. Вона враховує пористість шару, реологічні властивості середовища та вплив ОЕ, які змінюють напружено-деформований стан. Модель базується на нелінійній реології гранульованих матеріалів у псевдозрідженому стані, де дотичне напруження описується квадратичною функцією від швидкості зсуву. Це дозволяє відобразити перехід СЗМ від квазітвердого до розрідженого режиму.

Виведено рівняння руху шару, що враховує сухе тертя, інерційно-колізійні ефекти та локальний надлишковий тиск. Розв'язок рівнянь отримано у вигляді інтегральних залежностей, що визначають профіль швидкості та концентрації компонентів за глибиною шару. Для обчислень застосовано квадратичну апроксимацію концентрації частинок, яка адекватно відображає розподіл домішкових компонентів. Установлено, що локальний градієнт швидкості зростає із зменшенням пористості та збільшенням впливу ОЕ.

Запроваджено коефіцієнт структурності K_v , який феноменологічно враховує вплив ОЕ на реологію шару та кінематику компонентів СЗМ. Аналітичні залежності доводять, що підвищення частоти та амплітуди коливань ППП знижує K_v на 29,7–36,7%. Визначено, що для СЗМ кукурудзи $K_v = 0,12$, а для соняшнику $K_v = 0,043$, що зумовлює різницю у швидкості руху компонентів.

Продуктивність плоскої ППП визначається інтегрально з урахуванням концентраційного профілю, ширини ППП та її кінематики. Отримані закономірності зміни швидкості руху СЗМ та продуктивності від конструктивно-кінематичних параметрів ППП, параметрів ОЕ та властивостей СЗМ.

Для циліндричних ППП побудовано окрему аналітичну модель динаміки руху СЗМ у кільцевому шарі. Вона враховує комбінацію відцентрових, гравітаційних, інерційних і фрикційних сил, що діють на компоненти. В моделі використано гідродинамічну аналогію із урахуванням змінного коефіцієнта в'язкості за товщиною шару СЗМ. Отримані математичні вирази дозволяють визначити розподіл швидкості, тиску та продуктивності ППП з урахуванням параметрів ОЕ та властивостей СЗМ. Визначено діапазони варіювання та досліджено вплив узагальненого показника властивостей СЗМ - коефіцієнту динамічної в'язкості на рух компонентів на ППП. В'язкість псевдозрідженого шару СЗМ ідентифіковано як функцію коефіцієнта тертя та висоти шару. Встановлено, що швидкість руху СЗМ змінюється в межах 0,47–0,61 м/с (для СЗМ кукурудзи) і 0,34–0,69 м/с (для СЗМ соняшнику), а збільшення висоти ОЕ в дослідному діапазоні зменшує її значення на 4,31–10,2%.

Динамічний опір руху середовища оказує профіль та параметри ОЕ, які були досліджені щодо їх впливу на швидкість руху СЗМ та продуктивність ППП. Встановлено, що за заданих умов максимальні продуктивності досягаються при використанні ППП з ОЕ у вигляді трикутного поперечного профілю, де приріст складає 1,2–9,2% (для СЗМ кукурудзи) та 1,65–9,19% (для СЗМ соняшнику) порівняно з прямокутними та напівкруглими ОЕ. Проте компромісна задача попри мінімальний опір потребує визначення якості поділу компонентів СЗМ, що виконано шляхом подальших експериментів.

У другому розділі також проведено чисельне КЕ-моделювання напружено-деформованого стану ППП з урахуванням вібраційних і масових навантажень. Використано метод скінченних елементів для визначення власних частот, форм коливань і концентрацій напружень. Для симуляцій процесу зношення ППП, їх змодельовано як пластини зі змінною товщиною від 1 до 0,6мм, отворами та ОЕ з різними типами профілей. Результати КЕ-моделювання показали, що зменшення товщини пластини на 40% знижує жорсткість у три рази, підвищуючи ризик резонансних деформацій. Концентрація напружень локалізується між отворами та поблизу ОЕ, що підтверджено полем ізоліній.

Додаткове навантаження від шару СЗМ (192–250 Па) спричиняє нерівномірний розподіл напружень у робочій зоні ППП. Встановлено, що профіль ОЕ істотно впливає на рівні напружень: напівколо формує найнижчі піки, тоді як трикутний підвищує їх на 27,8–31%, а прямокутний – на 14,2–15,1%. Вірогідність росту локального напруження зі зменшенням товщини та переходом до континуальних профілів ОЕ узгоджується з теорією концентрації напружень.

Числове КЕ-моделювання дозволило визначити діапазони варіювання власних частот коливань дослідних ППП та ідентифікувати дорезонансність їх значень. Виділені чотири ймовірні моди коливань для дослідних ППП з найменшими значеннями частот коливань. Запропоновано коригувальні частотні коефіцієнти $K_{p\omega}$ для прогнозування частот коливань порівняно з суцільними пластинами, що спрощує наукові дослідження та інженерне проектування ППП.

Для оцінки втомної міцності вперше узгоджено критерій Гудмана з динамічним підсиленням DAF, ідентифікованим від частотного відношення $r = \omega / \omega_n$. Отримано реалістичні/граничні DAF для «найгіршого» випадку – ППП з трикутним профілем ОЕ та ЗСМ кукурудза при кінцевій товщині ППП $h = 0,6$ мм.

На основі рівнянь регресії та умов витривалості визначено порогові проектні товщини ППП для різних комбінацій профілю/схеми розташування ОЕ та навантажень СЗМ, при яких досягається відсутність деформацій. ППП з ОЕ у вигляді профілю напівкола показало найкращі показники надійності порівняно з іншими профілями ОЕ.

Побудовані аналітично-числові моделі забезпечують цілісну наукову систематизацію з констатацією суттєвих ефектів і кількісною оцінкою змін параметрів процесу сепарування СЗМ та ресурсу ППП.

У третьому розділі викладено програму, об'єкти та методику експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію аналітичних і чисельних моделей процесу сепарування СЗМ, визначенні технологічної ефективності, ресурсу ППП і пошуку її раціональних параметрів. Програма досліджень базувалася на трьох етапах: ідентифікацію динамічних показників та

технологічної ефективності, визначення показників надійності ППП та багатокритеріальна оптимізація параметрів процесу сепарування СЗМ.

Дослідження проводили на лабораторних сепараторах з використанням стандартизованих і розроблених методик, а багаторазове повторення дослідів забезпечило статистичну достовірність результатів із похибкою не більш як 5%. Дослідні ППП включали як штамповані базові конструкції з продовгуватими отворами, так і розроблені конструкції з об'ємними елементами трикутного, прямокутного й напівкруглого профілю. Досліджено вплив зміни типу профілю, їх розташування, товщини ППП на динамічні показники компонентів СЗМ соняшнику «Армагедон» та СЗМ кукурудзи «Любава 279 МВ».

Методика оцінки технологічної ефективності базувалася на визначенні продуктивності, питомого завантаження та повноти поділу компонентів. Отримані залежності дозволили встановити вплив кінематики та структури ППП на ефективність сепарування СЗМ. Швидкість руху компонентів СЗМ ідентифікували методом високошвидкісної відеозйомки (Phantom V9.1, 1000 кадрів/с), що забезпечило похибку не більше 2,5%.

Дослідження надійності ППП здійснювалися через вимірювання її зношування за товщиною та визначення коефіцієнтів надійності C . Для перевірки динамічних розрахунків проведено модальний аналіз із використанням вимірювальної системи Simcenter Testlab. Умови експериментальних досліджень відповідали чисельним симуляціям (МКЕ), а розбіжність даних частот власних коливань не перевищила 4,3%. Це підтверджує адекватність числових КЕ-моделей.

Оптимізацію параметрів ППП проведено за методами математичного планування експерименту відносно трьох значущих факторів: висоти ОЕ, коефіцієнта проникності ППП та висоти шару СЗМ. Як критерій оптимізації обрано продуктивність за фіксованої повноти поділу з урахуванням показників надійності. Побудовані рівняння регресії (поверхні відгуку) з достовірністю вище 95% забезпечують можливість прогнозування ефективності процесу сепарування за раціональних діапазонів варіювання параметрів ППП.

Розроблені рішення створюють науково обґрунтовану основу для проектування ППП об'ємною структурою з підвищеною ефективністю та надійністю.

У четвертому розділі представлено результати аналізу експериментів, спрямованих на перевірку адекватності аналітичних і чисельних моделей процесу сепарування СЗМ на ППП об'ємної структури. Визначено узгодженість експериментальних і розрахункових даних щодо динаміки СЗМ, технологічної продуктивності, надійності ППП. Комплекс отриманих результатів підтвердив достовірність попередніх теоретичних положень і забезпечив основу для подальшої оптимізації параметрів.

Встановлені властивості СЗМ кукурудзи та соняшнику узгоджуються з довідковими даними й уточнюють вихідні параметри аналітичних та чисельних моделей.

Експериментальні дослідження динаміки СЗМ із використанням високошвидкісної відеозйомки дозволили визначити середні швидкості руху і порівняти з даними аналітичних моделей: для дослідних умов розбіжність не перевищує 4,8%. Встановлено, що підвищення висоти ОЕ спричиняє зниження швидкості руху СЗМ на плоских ППП до 23%, а на циліндричних – до 8%. Коефіцієнти детермінації перевищили 0,98, що свідчить про повну відповідність даних аналітичних моделей та натурних експериментів.

Досліджено вплив кінематичних параметрів на продуктивність дослідних плоских та циліндричних ППП при сепаруванні СЗМ кукурудзи та соняшнику. Розбіжність між аналітичними й експериментальними результатами не перевищила 3,6%, що підтверджує адекватність розроблених моделей.

Дослідженнями зношування підтверджено істотну перевагу ППП об'ємної структури над базовими. Наявність ОЕ додає жорсткості ППП, що відображається на зниженні інтенсивності її зношення за товщиною. Для комплексного аналізу надійності ППП отримані значення коефіцієнтів та швидкості зношення. Крім того, розраховані граничні ресурси товщини підтвердили, що дослідні ППП мають подовжений термін служби (до 10 733

годин для дослідних СЗМ), який на 64,4% перевищує ресурс базових ППП. Експериментально підтверджено значний вплив типу профілю та параметрів ОЕ на довговічність ППП.

Експериментальний модальний аналіз дослідних ППП підтвердив високу точність КЕ-моделей: середнє відхилення власних частот не перевищує 4,4%. Це говорить про можливість подальшого практичного використання отриманої чисельної моделі для прогнозування резонансних режимів і втомної поведінки ППП.

За результатами багатофакторної оптимізації за планом Бокса–Бенкіна визначено раціональні діапазони параметрів плоскої ППП: відносна висота ОЕ $h_r=0,46-0,51$, кількість підшарів СЗМ $N_L=4,5-5,5$, коефіцієнт проникності $\varepsilon=0,270-0,285$. У цих межах забезпечується максимальна продуктивність $Q=0,030-0,039$ кг/с. Адекватність моделі підтверджена за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 95%.

Отримані експериментальні результати узагальнено у вигляді регресійних залежностей, що дозволяють прогнозувати ефективність, ресурс ППП і оптимальні параметри процесу сепарування. Підтверджено, що застосування ППП об'ємної структури забезпечує підвищення продуктивності, стабільність динамічних режимів і довговічність у порівнянні з традиційними конструкціями ППП.

У п'ятому розділі проведена оцінка технологічної ефективності та надійності розроблених перфорованих просіювальних поверхонь та їх виробнича апробація. Випробування розроблених ППП об'ємної структури проведено на базі ТДВ «Племзавод «Михайлівка» (с. Андріївське Сумського району Сумської області), СТОВ «Промінь» Лебединського району Сумської області, протягом 2024 – 2025 рр.

Для перевірки ефективності розроблених ППП було модернізовано сепаратори Петкус К-527 та БСХ-100. За результатами виробничих випробувань (табл.5.3) за рівних умов встановлено: ефективність процесу сепарування СЗМ кукурудзи та соняшнику розробленими ППП об'ємної структури порівняні з

базовими збільшує продуктивність сепараторів на 20...30%; відсутність відмов та технологічних збоїв. Отримані результати також доводять, що застосування ОЕ на ППП дозволяє не лише підвищити технологічну ефективність сепарації, але й істотно збільшити довговічність конструкцій за рахунок зменшення зношування, стабілізації напруженого стану та відтермінування моменту втомного руйнування. Різниця між модельними й натурними даними не перевищує $\pm 5\%$, що для тривалих випробувань є високим рівнем відповідності.

Додатково була проведена спільна (з представниками машинобудівного заводу ПрАТ Харківпродмаш) виробнича перевірка модернізованого сепаратору Buhler TAS 206A-5 з розробленими ППП об'ємної структури на ТОВ «Ханзе Агри». В результаті перевірки доведено підвищення продуктивності сепаратору Buhler TAS 206A-5 на 24...30%, що склало при сепаруванні СЗМ кукурудзи – 165т/год та соняшнику – 87 т/год. В результаті тривалої безвідмовної роботи та наявної технологічної ефективності розроблені ППП з обґрунтованими раціональними параметрами впроваджені у серійне виробництво на ПрАТ Харківпродмаш та можуть бути виготовлені під замовлення. Річний економічний ефект на ПрАТ Харківпродмаш від впровадження результатів роботи у серійне виробництво розроблених ППП складає 126 тис. грн при їх щорічній програмі випуску в 100 штук.

З аналізу питомих показників сепараторів встановлено, що за рахунок підвищення технологічної ефективності маємо зменшення витрат енергії на процес сепарування СЗМ розробленими ППП порівняно з базовими конструкціями на 11,1- 19,4%. Подібні зміни також характерні відносно витрат металу на забезпечення процесу сепарування СЗМ при використанні розроблених ППП, що становить на 8,7-21,2%.

Річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів з ППП об'ємної структури за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав: на СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області – 108,5 тис.грн, на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області – 93,6 тис.грн.

Відповідно до поставленої мети та задач у роботі отримані наступні **результати:**

1. На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень щодо збільшення технологічної ефективності та надійності сепарувального обладнання встановлено, що існуючі ППП не задовольняють зростаючі вимоги виробництва. Для цього запропоновано використати розроблені ППП об'ємної структури, які складаються з отворів та об'ємних елементів розташованих між ними, забезпечують інтенсивне просіювання компонентів СЗМ та поліпшують жорсткість конструкції. Виконання науково-технічного завдання з обґрунтування параметрів ППП потребує теоретичного та експериментального опрацювання, проведення оптимізації за критеріями продуктивність та надійність.

2. За допомогою розробленої гідродинамічної модель руху СЗМ, в якій ураховано псевдозрідження шару, «сухо-фрикційну» складову зсувних напружень, що дало змогу отримати узагальнені рівняння швидкості СЗМ та продуктивності плоских/циліндричних ППП об'ємної структури. Кількісна ідентифікація структурного ефекту ОЕ, врахування конструктивних та кінематичних параметрів ППП дозволила отримати: поля швидкості СЗМ кукурудзи/соняшнику - 0,47–0,61 м/с / 0,34–0,69 м/с, продуктивність ППП до 7,92 кг/с / до 4,41 кг/с. Вперше виявлено вплив типу профілю (трикутний, напівколо та прямокутний) та параметрів ОЕ на динамічні показники СЗМ, який запропоновано оцінювати через узагальнений коефіцієнт K_v .

3. Проведення числового стимуляційного моделювання дозволило провести КЕ-аналіз напружено-деформованого стану ППП об'ємної структури з варіацією її товщини, типу профілю та параметрів ОЕ, завантаженням шаром СЗМ. Досліджено показники надійності ППП через ідентифікацію напружень, частот власних коливань та витривалість конструкції. Встановлено, що зменшення товщини ППП (внаслідок абразивного зношення) підвищує пікові напруження в центральних та периферійних зонах, тоді як використання певних профілів (напівколо) здатне компенсувати та екстенсифікувати (до 31%) подібний ріст.

Визначено мінімальні допустимі параметри, які гарантують витривалість і нерезонансність конструкції ППП.

4. Втомна перевірка надійності ППП з ОЕ полягала в комплексному використанні методу Гудмана та DAF із прив'язкою до власних частот коливань поверхонь. Встановлені граничні значення товщин ППП $h_{\min}=0,60-0,92$ мм, що забезпечують цільовий рівень $\sigma_{\max} \leq 0,6 \sigma_{\text{eff}}$ для ППП з рядним/шаховим розташуванням ОЕ та навантаженням СЗМ. Для практичного використання запроваджено та облічені поправочні коефіцієнти частот K_{poe} , що дозволяють перераховувати власні частот коливань від базових суцільних пластин до ППП з різними типами ОЕ та схемами їх розташування.

5. Для перевірки аналітичних та чисельних моделей, уточненню діапазонів варіювання параметрів створено комплексну експериментальну методику для ідентифікації динамічних, технологічних і ресурсних параметрів процесу сепарування СЗМ, яка базується на оригінальних розроблених лабораторних установках та високоточному вимірювальному обладнанні: високошвидкісної відеозйомка, модальному аналізу із застосуванням сенсорів PCB та системи Simcenter Testlab 2019.1. Розроблені адаптовані методики визначення продуктивності, повноти поділу, швидкості руху компонентів та показників надійності ППП доповненні комплексними оціночними показниками (коефіцієнтами), які ураховують форми отворів, параметри об'ємну структуру ППП.

6. Експериментальними дослідженнями динаміки СЗМ за методом високошвидкісної відеозйомки встановлені діапазони швидкості шару СЗМ кукурудзи/соняшнику на плоских ППП: $0,093 \dots 0,110$ м/с/ $0,0054 \dots 0,0070$ м/с. Встановлено, що підвищення висоти ОЕ в дослідному діапазоні (до 4 мм) зменшує швидкість СЗМ до 23 % на плоских ППП і до 8% на циліндричних ППП. Відносна розбіжність між аналітичними та експериментальними результатами не перевищує 4,8 %, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі динаміки СЗМ. Встановлені залежності продуктивності ППП від їх конструктивно-кінематичних параметрів відповідають даним аналітичних

моделей з розбіжністю 3,6%. Тривалими експериментальними дослідженнями встановлено, що розроблені ППП з ОЕ мають підвищений ресурс до 64,4 % порівняно з базовими ППП, що підтверджує позитивний вплив конструктиву на показники надійності. Результати досліджень довели, що використання ППП об'ємної структури забезпечує комплексне підвищення продуктивності процесу сепарування СЗМ та поліпшення надійності.

7. В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу сепарування СМЗ за тривірневим планом Бокса–Бенкіна рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів плоскої ППП об'ємної структури: відносна висота ОЕ $h_f=0,46\dots0,51$; кількість підшарів СЗМ $N_L=4,5\dots5,5$; коефіцієнт проникності $\varepsilon=0,270\dots0,285$. Встановлено, що за визначеними параметрами максимальна продуктивність ППП становить $Q=0,030 - 0,039$ кг/с з перевіркою адекватності за критерієм Фішера (95 % довірчий рівень).

8. За результатами досліджень розроблено нормативно-технічну документацію на ППП об'ємної структури, яка впроваджена та використовується в серійному виробництві на ПрАТ «Харківпродмаш» (м.Харків) з річним економічним ефектом 126 тис.грн при річній програмі випуску 100 штук. Виробничими випробуваннями сепарувального обладнання модернізованого ППП об'ємної структури встановлено, що ефективність процесу сепарування СЗМ кукурудзи/соняшника підвищується на 20...30%, а довговічність ППП збільшується на 45-64%. Визначено, що інтенсифікація процесу сепарування СЗМ, за рахунок використання розроблених ППП об'ємної структури, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 11,1-19,4 % та 8,7-21,2 %, відповідно. Загальний щорічний економічний ефект від застосування модернізованих сепараторів у виробничих умовах СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області та на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області склав 203,1 тис. грн.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. *Вперше* встановлено функціональний взаємозв'язок між закономірностями продуктивності процесу сепарування СЗМ та параметрами ППП об'ємної структури за допомогою аналітичного моделювання, що дозволило кількісно технологічну ефективність та надійність сепарувального обладнання.

2. *Вперше* встановлені закономірності зміни власних частот коливань на напружень в ППП об'ємної структури за допомогою числового МКЕ моделювання, які оцінюють резонансні явища та визначають довговічність ППП.

3. Комплексно обґрунтуванні параметри ППП з ОЕ з врахуванням технологічних показників роботи сепарувальних машин і фізико-механічних властивостей компонентів СЗМ.

4. *Отримав подальший розвиток*: напрям моделювання поділу компонентів на ППП, який відрізняється врахуванням властивостей компонентів СЗМ, параметрів ОЕ.

5. *Удосконалено*: методи визначення програмованої ефективності процесу сепарування СЗМ на ППП, які доповнені критерієм надійності обладнання.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень комплексно обґрунтовані раціональні параметри ППП з ОЕ, використання яких підвищує ефективність роботи сепарувальних машин. Новизна запропонованої конструкції ППП з ОЕ та способу підвищення ефективності сепарування СЗМ підтверджені патентами.

Запропонована, науково-обґрунтована нова конструкція ППП складається з раціональних параметрів ОЕ та підвищує ефективність процесу сепарування СЗМ на 30...35%, що збільшує продуктивність сепарувальних машин на 24-28%, у порівнянні з існуючими.

Розроблена нормативно-технічна документація нової конструкції ППП на решетні сепаратори типу TAS 206A-5 (Buhler) та БЦС, виготовлено дослідні зразки, які успішно пройшли тривалу апробацію у виробничих умовах при очищенні зернових СЗМ пшениці, кукурудзи та соняшнику. Модернізовані

сепаратори апробовано у тривалих виробничих умовах ТОВ «Ханзе Агрі» (Сумська обл., Сумський р-н, смт. Степанівка). Загальний щорічний економічний ефект за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав 108 тис.грн. З 2024 року ПрАТ «Харківпродмаш» (м. Харків) впровадив у серійне виробництво решета з ОЕ з економічним ефектом 126 тис. грн при їх щорічній програмі випуску в 100 штук. Річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів з ППП об'ємної структури за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав: на СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області – 108,5 тис.грн, на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області – 93,6 тис.грн.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: огляд і аналіз стану досліджень, визначення перспективних способів підвищення ефективності очищення отворів ППП; одержання математичної моделі динаміки СЗМ по розроблених ППП, обробка та аналіз результатів; експериментальна ідентифікація параметрів процесу сепарування СЗМ та обробка результатів; комплексне обґрунтування параметрів ППП з ОЕ та наведення рекомендацій щодо подальшого застосування розробки. Запропонована конструкція ППП з ОЕ та спосіб підвищення ефективності очищення отворів захищені патентами.

Апробація результатів дисертації. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-практичних конференціях (НПК): на XIV Міжнародній НПК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кропивницький, ЦУНТУ, 8.11.2023 р.); на VI Міжнародній НПК «Інновації: теорія і практика» (Академія прикладних наук, Кропивницький, 6.12.2023 р.); на VI Всеукраїнській НПК «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (ПДАУ, Полтава, 21.12.2023р.); на MSN 10th International Scientific Symposium "Advances in techniques of production and machine

construction" (Lublin, 26.05.2024); на 3rd Workshop on Experimental and Computational Mechanics – WECM '24 (LUT, Lublin, 27.05.2024).

Основні результати дисертаційної роботи, їх узагальнення та викладені наукові положення та висновки, що становлять суть роботи, отримані та сформульовані автором самостійно.

Ключові слова: сепарація, зерно, сепараційна машина, перфоровані просіювальні поверхні, об'ємні елементи, продуктивність, надійність, моделювання, вібрація, кукурудза, дисперсні частинки, рівняння динаміки, модель зерна, орієнтація насіння, зношування.

ABSTRACT

Stelmakh A.M. Justification of parameters for the separation of loose media on sieves with a volumetric structure. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical Engineering in the specialty 133 - Industrial Mechanical Engineering. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The dissertation is devoted to solving a relevant scientific and practical problem of increasing the efficiency of the separation process of loose grain materials (LGM) through the substantiation of parameters of perforated sifting surfaces (PSS) with a volumetric structure. Solving this problem contributes to improving the technological efficiency and reliability of separation equipment, which is of particular importance for enhancing food security and is highly relevant for Ukraine.

The object of the study is the separation process of loose grain materials and its relationship with the design parameters of perforated sifting surfaces.

The subject of the study is the comprises the regularities of the dynamics of loose grain materials and the reliability of perforated sifting surfaces, as well as the substantiation of parameters of volumetric structured PSS that ensure the required productivity and durability of sifting surfaces in separation equipment.

The purpose and tasks of research

The **purpose** of the work is to increase the efficiency of the separation process of loose grain materials by substantiating the parameters of the developed PSS with a volumetric structure.

To fulfill the set goal, the following **tasks** must be solved:

1. To analyze and identify promising methods for increasing the efficiency of the sieve-based separation process of loose grain materials;
2. To perform analytical and experimental determination of the velocity components of loose grain material particles on the developed PSS with volumetric elements, and to establish the regularities of changes in separation efficiency

considering the properties of loose grain materials, as well as the design, kinematic, and technological parameters of the sifting surfaces;

3. To carry out a comprehensive substantiation of the design parameters of PSS with volumetric elements, taking into account operating kinematic regimes, specific loadings, and the physical and mechanical properties of loose grain materials;

4. To develop, manufacture, and conduct comparative industrial tests of the proposed PSS with volumetric elements in comparison with conventional designs, to determine the technical and economic efficiency of their application, and to implement them in serial production.

General characteristics of the dissertation

In the **Introduction**, the relevance of the dissertation topic and the choice of scientific objectives are substantiated; the purpose and objectives of the research are formulated; the scientific novelty and practical significance of the obtained results are defined; and information on approbation, structure, and scope of the dissertation is provided.

In **Chapter 1**, a systematic analysis of the current state of LGM separation processes is carried out, and the main factors determining their efficiency are identified. It is established that limitations in productivity are primarily associated with imperfections in the design of PSS. A promising direction for increasing technological efficiency is identified as the intensification of intralayer motion of passing components through the use of additional volumetric elements that form a volumetric structure of the sifting surface.

The application of such structurally modified PSS improves segregation conditions, activates the screening of material components, and intensifies the separation process of LGM as a whole without a significant increase in energy consumption.

Based on the conducted analysis, a classification of PSS designs is developed, and a scientific and technical problem is formulated. The efficiency indicators of the separation process are defined in terms of the following criteria: productivity,

separation completeness, and durability. This provided the basis for formulating the purpose and objectives of further research.

In the **second chapter**, a theoretical framework for modeling the separation processes of LGM and for assessing the reliability of PSS is developed. A comparative analysis of classical and modern approaches to the mathematical description of LGM motion is performed, including analytical, semi-empirical, DEM-based, and hydrodynamic models. It is established that the latter approach, based on the Navier–Stokes continuity and momentum equations, provides the most comprehensive description of the collective particle dynamics. Its application enables a correct evaluation of pressure, velocity, and density parameters of the LGM layer under the action of a vibrating PSS.

To improve the accuracy of separation process modeling, a generalized model of LGM motion on a flat PSS with a volumetric structure is developed. The model accounts for layer porosity, rheological properties of the medium, and the influence of volumetric elements, which alter the stress–strain state of the layer. The model is based on the nonlinear rheology of granular materials in a pseudo-fluidized state, where the shear stress is described by a quadratic function of the shear rate. This formulation enables representation of the transition of LGM from a quasi-solid to a loosened flow regime.

Equations of motion of the material layer are derived, taking into account dry friction, inertial-collisional effects, and local excess pressure. The solutions are obtained in the form of integral relationships that determine velocity and concentration profiles of components over the layer depth. For computational purposes, a quadratic approximation of particle concentration is employed, which adequately represents the distribution of impurity components. It is established that the local velocity gradient increases with decreasing porosity and increasing influence of volumetric elements.

A structural coefficient K_v is introduced, which phenomenologically accounts for the effect of volumetric elements on the rheology of the layer and the kinematics of LGM components. Analytical dependencies demonstrate that increasing the vibration frequency and amplitude of the PSS reduces K_v by 29.7–36.7%. It is determined that

for corn LGM $K_v = 0.12$, while for sunflower LGM $K_v = 0.043$, which explains the differences in component motion velocity.

The productivity of a flat PSS is determined integrally, taking into account the concentration profile, the width of the PSS, and its kinematic parameters. The obtained relationships describe variations in LGM motion velocity and productivity as functions of the design–kinematic parameters of the PSS, parameters of the volumetric elements, and material properties of the LGM.

For cylindrical PSS, a separate analytical model of LGM dynamics in an annular layer is developed. The model accounts for the combined action of centrifugal, gravitational, inertial, and frictional forces acting on the components. A hydrodynamic analogy is applied, considering a variable viscosity coefficient across the thickness of the LGM layer. The resulting mathematical expressions allow determination of velocity, pressure, and productivity distributions of the PSS with regard to volumetric element parameters and LGM properties. Ranges of variation are established, and the influence of a generalized LGM property indicator, the dynamic viscosity coefficient, on component motion over the PSS is investigated. The viscosity of the pseudo-fluidized LGM layer is identified as a function of the friction coefficient and layer height. It is established that the LGM motion velocity varies within 0.47–0.61 m/s for corn LGM and 0.34–0.69 m/s for sunflower LGM, while an increase in the height of volumetric elements within the investigated range reduces this velocity by 4.31–10.2%.

The dynamic resistance of the medium is significantly influenced by the profile and parameters of the volumetric elements, which are investigated with respect to their effect on LGM motion velocity and PSS productivity. It is found that, under given conditions, maximum productivity is achieved when using PSS with volumetric elements having a triangular cross-section, where the increase reaches 1.2–9.2% for corn LGM and 1.65–9.19% for sunflower LGM compared to rectangular and semicircular volumetric elements. However, despite minimal resistance, the compromise design problem requires evaluation of separation quality of LGM components, which is addressed through subsequent experimental studies.

The second chapter also presents numerical finite element (FE) modeling of the stress–strain state of the PSS under vibrational and mass loads. The finite element method is used to determine natural frequencies, vibration modes, and stress concentration zones. To simulate PSS wear processes, the surfaces are modeled as plates with variable thickness ranging from 1.0 to 0.6 mm, incorporating perforations and volumetric elements of different profile types. FE simulation results show that a 40% reduction in plate thickness decreases stiffness by a factor of three, significantly increasing the risk of resonant deformations. Stress concentration is localized between perforations and near volumetric elements, as confirmed by isoline fields. Additional loading from the LGM layer (192–250 Pa) causes a non-uniform stress distribution in the working zone of the PSS. It is established that the volumetric element profile substantially affects stress levels: semicircular profiles generate the lowest stress peaks, while triangular profiles increase them by 27.8–31%, and rectangular profiles by 14.2–15.1%. The probability of local stress growth with decreasing plate thickness and transition to continuous volumetric element profiles is consistent with stress concentration theory.

Numerical FE modeling enables determination of variation ranges of natural vibration frequencies of the investigated PSS and identification of their pre-resonant values. Four probable vibration modes with the lowest natural frequencies are identified for the studied PSS. Corrective frequency coefficients $K_{p\omega}$ are proposed to predict vibration frequencies relative to solid plates, thereby simplifying scientific investigations and engineering design of PSS. For fatigue strength assessment, the Goodman criterion is, for the first time, consistently combined with the dynamic amplification factor (DAF), identified from the frequency ratio $r = \omega/\omega_n$. Realistic limiting DAF values are obtained for the “worst-case” scenario – PSS with triangular volumetric element profiles operating with corn LGM at a final PSS thickness of $h = 0.6\text{mm}$.

Based on regression equations and endurance conditions, threshold design thicknesses of PSS are determined for various combinations of volumetric element profile, arrangement scheme, and BLGM loading, at which deformation-free operation

is achieved. PSS with semicircular volumetric element profiles demonstrate the highest reliability indicators compared to other volumetric element profiles.

The developed analytical–numerical models provide an integrated scientific systematization with identification of significant effects and quantitative assessment of changes in separation process parameters of LGM and the service life of PSS.

The **third chapter** presents the research program, objects, and methodology of experimental investigations aimed at verifying the analytical and numerical models of the separation process of LGM, determining technological efficiency, service life of PSS, and identifying their rational parameters. The research program was structured into three stages: identification of dynamic indicators and technological efficiency, determination of reliability indicators of PSS, and multicriteria optimization of LGM separation process parameters.

Experimental studies were conducted on laboratory separators using standardized and specially developed methodologies. Multiple repetitions of experiments ensured statistical reliability of the results with an error not exceeding 5%. The experimental PSS included both stamped baseline designs with elongated perforations and newly developed designs with volumetric elements of triangular, rectangular, and semicircular profiles. The influence of profile type, arrangement, and PSS thickness on the dynamic indicators of LGM components of sunflower “Armagedon” and corn “Liubava 279 MV” was investigated.

The methodology for assessing technological efficiency was based on determining productivity, specific loading, and separation completeness of components. The obtained dependencies made it possible to establish the influence of PSS kinematics and structure on the efficiency of LGM separation. The velocity of LGM component motion was identified using high-speed video recording (Phantom V9.1, 1000 frames/s), ensuring a measurement error not exceeding 2.5%.

Reliability studies of PSS were carried out by measuring thickness wear and determining reliability coefficients C . To verify dynamic calculations, modal analysis was performed using the Simcenter Testlab measurement system. The experimental conditions corresponded to numerical simulations (finite element method), and

discrepancies in natural vibration frequencies did not exceed 4.3%, confirming the adequacy of the numerical FE models.

Optimization of PSS parameters was performed using mathematical design of experiments with respect to three significant factors: height of volumetric elements, permeability coefficient of the PSS, and height of the LGM layer. Productivity at a fixed separation completeness, considering reliability indicators, was selected as the optimization criterion. The constructed regression equations (response surfaces) with reliability exceeding 95% enable prediction of separation process efficiency within rational ranges of PSS parameter variation.

The developed solutions provide a scientifically substantiated basis for designing PSS with a volumetric structure, ensuring increased efficiency and reliability.

The **fourth chapter** presents the results of analysis of experimental studies aimed at verifying the adequacy of analytical and numerical models of the LGM separation process on volumetric-structured PSS. Agreement between experimental and calculated data regarding LGM dynamics, technological productivity, and PSS reliability is established. The obtained results confirm the validity of the previously developed theoretical provisions and provide a basis for further parameter optimization.

The experimentally determined properties of corn and sunflower LGM are consistent with reference data and refine the initial parameters of the analytical and numerical models.

Experimental investigations of LGM dynamics using high-speed video recording made it possible to determine average motion velocities and compare them with analytical model predictions; under the investigated conditions, discrepancies did not exceed 4.8%. It is established that increasing the height of volumetric elements leads to a reduction in LGM motion velocity on flat PSS by up to 23%, and on cylindrical PSS by up to 8%. Coefficients of determination exceeded 0.98, indicating excellent agreement between analytical model predictions and full-scale experimental data.

The influence of kinematic parameters on the productivity of experimental flat and cylindrical PSS during separation of corn and sunflower LGM was investigated. Discrepancies between analytical and experimental results did not exceed 3.6%, confirming the adequacy of the developed models.

Wear studies confirmed the significant advantage of volumetric-structured PSS over baseline designs. The presence of volumetric elements increases the stiffness of the PSS, which manifests in a reduced intensity of thickness wear. For comprehensive reliability analysis, wear coefficients and wear rates were determined. In addition, calculated limiting thickness resources confirmed that the experimental PSS exhibit an extended service life (up to 10,733 hours for the investigated LGM), exceeding the service life of baseline PSS by 64.4%. A significant influence of volumetric element profile type and parameters on PSS durability was experimentally confirmed.

Experimental modal analysis of the investigated PSS confirmed the high accuracy of FE models: the average deviation of natural frequencies did not exceed 4.4%. This indicates the feasibility of further practical application of the developed numerical model for predicting resonant regimes and fatigue behavior of PSS.

Based on multifactor optimization using the Box–Behnken design, rational parameter ranges for flat PSS were determined: relative height of volumetric elements $h_r = 0.46–0.51$, number of BLGM sublayers $N_L = 4.5–5.5$, and permeability coefficient $\varepsilon = 0.270–0.285$. Within these ranges, maximum productivity $Q = 0.030–0.039\text{kg/s}$ is achieved. Model adequacy was confirmed using the Fisher criterion with a confidence probability of 95%.

The obtained experimental results are generalized in the form of regression relationships that allow prediction of efficiency, service life of PSS, and optimal parameters of the separation process. It is confirmed that the application of volumetric-structured PSS ensures increased productivity, stability of dynamic regimes, and extended durability compared to traditional PSS designs.

In the **fifth chapter**, an assessment of the technological efficiency and reliability of the developed PSS is carried out, along with their industrial validation. Production-scale testing of the developed volumetric-structured PSS was conducted at agricultural

enterprises TDV “Plemzavod Mykhailivka” (Andriivske village, Sumy District, Sumy Region, Ukraine), STOV “Promin” (Lebedyn District, Sumy Region, Ukraine) during 2024–2025.

To verify the effectiveness of the developed PSS, the Petkus K-527 and BSKh-100 separators were modernized. According to the results of industrial trials, under identical operating conditions it was established that the use of volumetric-structured PSS for separation of LGM of corn and sunflower, compared to baseline designs, increases separator productivity by 20–30%, while ensuring the absence of failures and technological malfunctions. The obtained results also demonstrate that the application of volumetric elements on PSS not only enhances the technological efficiency of separation but also significantly increases structural durability by reducing wear intensity, stabilizing the stress state, and delaying the onset of fatigue failure. The discrepancy between model-based predictions and full-scale experimental data does not exceed $\pm 5\%$, which represents a high level of agreement for long-term industrial testing.

Additionally, joint industrial validation (together with representatives of a machine-building plant PJSC “Kharkivprod mash”) of a modernized Buhler TAS 206A-5 separator equipped with the developed volumetric-structured PSS was carried out on TOV “Khanze Agri”. The results confirmed an increase in the productivity of the Buhler TAS 206A-5 separator by 24–30%, corresponding to 165 t/h during separation of corn LGM and 87 t/h for sunflower LGM. As a result of prolonged failure-free operation and demonstrated technological efficiency, the developed PSS with substantiated rational parameters were implemented in serial production and can be manufactured upon request. The annual economic effect on PJSC “Kharkivprod mash” from the introduction of the developed PSS into serial production amounts to 126 thousand UAH, assuming an annual production volume of 100 units.

Analysis of specific performance indicators of the separators shows that, due to increased technological efficiency, energy consumption for the LGM separation process using the developed PSS is reduced by 11.1–19.4% compared to baseline

designs. Similar improvements are observed in terms of metal consumption required to ensure the separation process, which is reduced by 8.7–21.2% when using the developed volumetric-structured PSS.

The annual economic effect resulting from the use of modernized separators equipped with volumetric-structured perforated sifting surfaces, due to reduced operating costs, amounted to 108.5 thousand UAH at STOV “Promin” (Lebedyn District, Sumy Region, Ukraine) and 93.6 thousand UAH at TDV “Plemzavod Mykhailivka” (Andriivske village, Sumy District, Sumy Region, Ukraine).

In accordance with the set goal and tasks, the following results were obtained in the work:

1. Based on the assessment and comprehensive analysis of research results aimed at increasing the technological efficiency and reliability of separation equipment, it has been established that existing PSS no longer meet the growing demands of modern production. To address this limitation, volumetric-structured PSS have been proposed, consisting of perforations and volumetric elements arranged between them, which ensure intensified sifting of LGM components and improved structural stiffness. Fulfillment of the scientific and technical task of substantiating PSS parameters requires combined theoretical and experimental investigation, as well as optimization based on productivity and reliability criteria.

2. Using the developed hydrodynamic model of LGM motion, which accounts for layer pseudo-fluidization and the dry-friction component of shear stresses, generalized equations for LGM velocity and productivity of flat and cylindrical volumetric-structured PSS were obtained. Quantitative identification of the structural effect of volumetric elements, together with consideration of design and kinematic parameters of PSS, enabled determination of LGM velocity fields for corn/sunflower of 0.47–0.61 m/s and 0.34–0.69 m/s, respectively, and PSS productivity of up to 7.92 kg/s and 4.41 kg/s. For the first time, the influence of volumetric element profile type (triangular, semicircular, rectangular) and parameters on LGM dynamic characteristics was identified and proposed to be evaluated using a generalized structural coefficient K_v .

3. Numerical simulation made it possible to perform FE analysis of the stress–strain state of volumetric-structured PSS with variation in thickness, volumetric element profile type and parameters, under loading by a LGM layer. Reliability indicators were investigated through identification of stress distributions, natural vibration frequencies, and structural endurance. It was established that a reduction in PSS thickness due to abrasive wear increases peak stresses in central and peripheral zones, while the use of specific profiles (semicircular) can compensate for and attenuate (up to 31%) this increase. Minimum allowable parameters ensuring endurance and non-resonant operation of PSS were determined.

4. Fatigue reliability assessment of PSS with volumetric elements was performed using a combined application of the Goodman method and the dynamic amplification factor (DAF), referenced to the natural vibration frequencies of the surfaces. Limiting thickness values of PSS $h_{\min} = 0.60\text{--}0.92\text{mm}$ were established, ensuring the target stress level $\sigma_{\max} \leq 0.6\sigma_{\text{eff}}$ for PSS with inline and staggered arrangements of volumetric elements under LGM loading. For practical application, corrective frequency coefficients $K_{p\omega}$ were introduced and calculated, allowing conversion of natural frequencies from solid plates to volumetric-structured PSS with different volumetric element types and arrangement schemes.

5. To verify analytical and numerical models and refine parameter variation ranges, a comprehensive experimental methodology was developed for identification of dynamic, technological, and service-life parameters of the LGM separation process. The methodology is based on original laboratory test rigs and high-precision measuring equipment, including high-speed video recording, modal analysis using PCB sensors, and the Simcenter Testlab 2019.1 system. Adapted methods for determining productivity, separation completeness, component motion velocity, and PSS reliability indicators were developed and supplemented with integrated evaluation coefficients accounting for perforation geometry and volumetric structure parameters of PSS.

6. Experimental investigations of LGM dynamics using high-speed video recording established LGM layer velocity ranges on flat PSS of 0.093–0.110 m/s for corn and 0.0054–0.0070 m/s for sunflower. It was determined that increasing the height

of volumetric elements within the investigated range (up to 4 mm) reduces LGM velocity by up to 23% on flat PSS and up to 8% on cylindrical PSS. The relative discrepancy between analytical and experimental results does not exceed 4.8%, confirming the adequacy of the developed analytical LGM dynamics model. The established dependencies of PSS productivity on design and kinematic parameters correspond to analytical model predictions with a discrepancy of 3.6%. Long-term experimental studies demonstrated that the developed volumetric-structured PSS exhibit an increased service life of up to 64.4% compared to baseline PSS, confirming the positive effect of the proposed design on reliability indicators. The results prove that the use of volumetric-structured PSS ensures a comprehensive increase in LGM separation productivity and reliability.

7. As a result of a multifactor experimental study of the LGM separation process based on a three-level Box–Behnken design, the following rational values of design and technological parameters for flat volumetric-structured PSS were recommended: relative volumetric element height $h_r = 0.46–0.51$; number of BLGM sublayers $N_L = 4.5–5.5$; permeability coefficient $\varepsilon = 0.270–0.285$. Under these parameters, the maximum PSS productivity reaches $Q = 0.030–0.039\text{kg/s}$, with model adequacy confirmed by the Fisher criterion at a 95% confidence level.

8. Based on the research results, regulatory and technical documentation for volumetric-structured PSS was developed, implemented, and used in serial production at PJSC “Kharkivprod mash” (Kharkiv, Ukraine), yielding an annual economic effect of 126 thousand UAH with an annual production volume of 100 units. Industrial trials of separation equipment modernized with volumetric-structured PSS demonstrated that the efficiency of LGM separation for corn and sunflower increases by 20–30%, while PSS durability increases by 45–64%. It was determined that intensification of the LGM separation process through the use of the developed volumetric-structured PSS is accompanied by a reduction in specific energy and metal consumption by 11.1–19.4% and 8.7–21.2%, respectively. The total annual economic effect from the application of modernized separators under production conditions amounted to 203.1 thousand UAH.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time, a functional relationship between the productivity patterns of the LGM separation process and the parameters of volumetric-structured PSS has been established by means of analytical modeling, which enabled quantitative assessment of the technological efficiency and reliability of separation equipment.

2. For the first time, regularities of variation of natural vibration frequencies and stress levels in volumetric-structured PSS have been determined using numerical finite element modeling, allowing evaluation of resonant phenomena and prediction of PSS durability.

3. The parameters of PSS with volumetric elements have been comprehensively substantiated with consideration of technological performance indicators of separation machines and the physical and mechanical properties of LGM components.

4. The direction of modeling the separation of components on PSS has been further developed by incorporating the properties of LGM components and the parameters of volumetric elements.

5. Methods for determining the programmed efficiency of the LGM separation process on PSS have been improved by supplementing them with equipment reliability criteria.

The practical significance of the obtained results. Based on theoretical and experimental studies, rational parameters of PSS with volumetric elements have been comprehensively substantiated, the application of which increases the operating efficiency of separation machines. The novelty of the proposed PSS design with volumetric elements and the method for improving LGM separation efficiency is confirmed by patents.

The proposed scientifically substantiated new PSS design, incorporating rational parameters of volumetric elements, increases the efficiency of the LGM separation process by 30–35%, which leads to an increase in the productivity of separation machines by 24–28% compared to existing designs.

Regulatory and technical documentation for the new PSS design has been developed for sieve separators of the TAS 206A-5 (Bühler) and BCS types. Prototype samples were manufactured and successfully underwent long-term industrial

validation during the cleaning of wheat, corn, and sunflower LGM. The modernized separators were tested under prolonged production conditions at LLC “Hanze Agri” (Stepanivka settlement, Sumy District, Sumy Region, Ukraine). The total annual economic effect due to reduced operating costs amounted to 108 thousand UAH.

Since 2024, PJSC “Kharkivprod mash” (Kharkiv, Ukraine) has implemented the volumetric-element PSS in serial production, achieving an annual economic effect of 126 thousand UAH with an annual production program of 100 units.

The annual economic effect from the use of modernized separators equipped with volumetric-structured PSS, due to reduced operating costs, amounted to 108.5 thousand UAH at STOV “Promin” (Lebedyn District, Sumy Region, Ukraine) and 93.6 thousand UAH at TDV “Plemzavod Mykhailivka” (Andriivske village, Sumy District, Sumy Region, Ukraine).

The main results of the dissertation work, their summaries and the stated scientific propositions and conclusions, which constitute the essence of the work, were obtained and formulated by the author independently.

Key words: *separation, grain, separating machine, perforated sifting surfaces, volumetric elements, productivity, reliability, simulation, vibration, corn, dispersed particles, equations of dynamics, grain model, seed orientation, wear.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Stelmakh A. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(8):238-255. doi:10.12913/22998624/194114.

Здобувач розробив аналітичну модель динаміки СЗМ по циліндричним ППП об'ємної структури, провів аналіз визначив закономірності зміни швидкості СЗМ.

2. Kharchenko, S.O., Kharchenko, F.M., Stelmakh, A.M., Pogulyai, V.M., Mayorov, O.V., Guz, O.I. (2024). Analysis of perforated sifting surfaces of separation equipment and prospects for their development. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (57)), 56-63. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.8>.

Здобувач провів аналіз відомих досліджень процесу сепарування СЗМ, узагальнив конструкції ППП які інтенсифікують процес.

3. Харченко С.О., Біловод О.І.1, Харченко Ф.М., Стельмах А.М., Тіманов В.В., Чигрин А.І. Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. I. С.265-271.

Здобувачем розроблена методика визначення показників надійності ППП, запропоновано використання узагальнених коефіцієнтів та показників.

4. Стельмах А.М. Моделювання динаміки сипких зернових матеріалів на перфорованих просіювальних віброповерхнях. *Вісник СНАУ: Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2025. Вип. 3 (61). С.125-134.

Здобувачем розроблена математична модель руху СЗМ по плоским ППП, визначені аналітичні закономірності зміни швидкості руху та продуктивності ППП.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Харченко С., Харченко Ф., Стельмах А. Фактори ефективності решетного сепарування сипких середовищ // Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С.212.

Здобувачем визначені значущі фактори технологічної ефективності процесу сепарування СЗМ.

6. Харченко Ф.М., Котляревський І.В., Стельмах А.М. Аналіз методів ідентифікації властивостей компонентів зернових сумішей при їх подальшому сепаруванні / Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. – С.210-213.

Здобувачем проведено аналіз та визначені методи ідентифікації властивостей СЗМ, які впливають на технологічну ефективності та надійність конструкції.

7. Стельмах А.М., Рябка Д.О., Харченко С.О. Методика та результати поділу насінневих сумішей за розмірами / Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції (21-23 жовтня 2024 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2024 – С.137.

Здобувач запропонував методика визначення продуктивності та якості процесу решітного сепарування СЗМ.

8. Research on methods and analysis of results of the natural oscillation frequency of cylindrical perforated sifting surfaces with ruffles / S. Kharchenko, S. Samborski, F. Kharchenko, A. Stelmakh. 3rd Workshop on Experimental and Computational Mechanics – WECM '24, Lublin, 27 maja 2024 - 28 maja 2024. BOOK OF ABSTRACT. P.12.

Здобувач запропонував методика та провів аналіз результатів визначення власної частоти коливань ППП.

9. Dynamics of loose materials and oscillations of perforated cylindrical sifting surfaces with volumetric riffles / S. Kharchenko, S. Samborski, F. Kharchenko, A. Mitura, J. Paśnik, A. Stelmakh. 10th International Scientific Symposium “Advances in techniques of production and machine construction”: program, Lublin, 26 maja 2024 - 29 maja 2024.

Здобувач провів аналіз результатів дослідження динаміки СЗМ та частот коливань ППП з ОЕ.

Список патентів:

10. Пат. на корисну модель 159886 Україна, МПК В07В 1/28. Решето / М.В. Бакум, UA; С.О. Харченко, UA; Ф.М. Харченко, UA; А.М. Стельмах, UA; та ін.; и 2024 05513; заявл. 21.11.24; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29.

Здобувач запропонував нове конструктивне рішення ППП об'ємної структури.

11. Пат. на корисну модель 160024 Україна: МПК В07В 1/28. Профільоване решето / М.В. Бакум, UA; С.О. Харченко, UA; Ф.М. Харченко, UA; А.М. Стельмах, UA; та ін.; № и 2024 06046; заявл. 18.12.24; опубл. 30.07.2025, Бюл. № 31.

Здобувач запропонував нове конструктивне рішення ППП об'ємної структури.

Зміст

ВСТУП	36
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	43
1.1. Огляд досліджень процесів сепарування сипких зернових матеріалів.....	43
1.2. Огляд конструкцій перфорованих просіювальних поверхонь.....	50
1.3. Постановка науково-технічного завдання.....	57
1.4. Показники ефективності сепарувального обладнання.....	59
1.5. Висновки за розділом, постановка мети та завдання дослідження.....	62
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ СИПКИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НАДІЙНОСТІ ПЕРФОРОВАНИХ ПРОСІЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ.....	65
2.1. Динаміка сипких зернових матеріалів на перфорованих просіювальних поверхнях.....	65
2.2. Чисельні моделювання надійності перфорованих просіювальних поверхонь.....	93
2.3. Висновки за розділом.....	111
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	113
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	113
3.2. Опис об'єктів дослідження.....	114
3.3. Методика експериментальних досліджень.....	121
3.4. Висновки по розділу.....	132
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ.....	133
4.1. Властивості зернових матеріалів.....	133

4.2. Закономірності динаміки зернових матеріалів та технологічної ефективності просіювальних поверхонь.....	134
4.3. Закономірності зміни показників надійності перфорованої поверхні.....	140
4.4. Результати багатofакторного експерименту.....	144
4.5. Висновки за розділом.....	146
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ПЕРФОРОВАНИХ ПРОСІЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ТА ЇХ ВИРОБНИЧА АПРОБАЦІЯ.....	148
5.1. Виробнича апробація розроблених перфорованих просіювальних поверхонь	148
5.2. Ефективність від використання розроблених просіювальних поверхонь і впровадження їх у серійне виробництво.....	159
5.3. Висновки за розділом.....	161
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
ДОДАТКИ.....	188
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	189
ДОДАТОК Б КОДИ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО ОБЧИСЛЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ВИРАЗІВ.....	191
ДОДАТОК В РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО (МСЕ) МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ППП ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ.....	217
ДОДАТОК Д ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ	222
ДОДАТОК Е АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ, УГОДА, ПАТЕНТИ.....	238

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Сепарування сипких матеріалів є одною з розповсюджених операцій в технологіях аграрних, харчових, хімічних, будівельних, гірсько-рудних та інших виробництв. Процеси решетного сепарування передбачають поділ компонентів сипких матеріалів за розмірами, що забезпечує якість подальшої обробки та переробки, можливість тривалого зберігання кінцевих продуктів. Виробництво, обробка, переробка та зберігання зерна, яке за властивостями відноситься до сипких зернових матеріалів (СЗМ), передбачає використання решетних сепарувальних машин, які визначають якісні показники насінневого матеріалу, продовольчого зерна.

Сучасні умови та вимоги виробництва потребують від сепарувальних машин підвищення технологічного ефективності (продуктивності та якості), надійності, енергозбереження, мінімізації травмування компонентів СЗМ. Створення ефективних робочих органів - перфорованих просіювальних поверхонь (ППП) здані задовільнити зростаючі та складні умови.

Аналізом досліджень процесу решітного сепарування СЗМ встановлено, що перспективним напрямом підвищення його ефективності є відділення крупних компонентів сипких матеріалів з робочої зони за рахунок застосування ППП з об'ємною структурою. Об'ємні елементи (ОЕ) відводять крупні компоненти СЗМ на поверхню шару, що дає змогу іншим дрібним компонентам безперешкодно просіюватися в отвори ППП. Однак відомі дослідження не містять даних про подібні дослідження. Таким чином, Обґрунтування параметрів процесу сепарування сипких середовищ на решетах з об'ємною структурою, є актуальним завданням для розвитку зернопереробної галузі України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до комплексної теми наукових досліджень з

ПрАТ «Харківпродмаш» м.Харків «Підвищення ефективності роботи зернових сепараторів» (договір від 26.08.2024 р.); науково-дослідної роботи: «Обґрунтування параметрів процесу сепарування сипких середовищ на решетах з об'ємною структурою» (ДР № 0115 U 002722, 2024 - 2026 рр.).

Метою роботи є підвищення ефективності процесу сепарування сипких зернових матеріалів очищення шляхом обґрунтування параметрів розроблених перфорованих просіювальних поверхонь з об'ємною структурою.

Завдання для дослідження:

1. Провести аналіз та визначити перспективні способи підвищення ефективності процесу решетного сепарування СЗМ;
2. Виконати аналітичне та експериментальне визначення складових швидкості компонентів СЗМ на розроблених ППП з ОЕ, встановити закономірності зміни ефективності процесу сепарування з урахуванням властивостей компонентів СЗМ, конструктивно-кінематичних та технологічних параметрів ППП;
3. Виконати комплексне обґрунтування конструктивних параметрів ППП з ОЕ з урахуванням кінематичних режимів роботи, питомих навантажень, фізико-механічних властивостей СЗМ;
4. розробити, виготовити та провести порівняльні із базовими виробничі випробування розроблених ППП з ОЕ, визначити техніко-економічну ефективність їх застосування, впровадити їх в серійне виробництво.

Об'єкт дослідження – процес сепарування СЗМ, його зв'язок з конструктивними параметрами ППП.

Предмет дослідження – закономірності динаміки СЗМ та надійності ППП, обґрунтування параметрів ППП об'ємної структури, що забезпечують необхідну продуктивність та довговічність ППП сепарувального обладнання.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із застосуванням основних положень гідродинаміки, механіки коливань, теорії міцності. Розв'язок побудованої математичної моделі виконано з використанням методів розв'язання диференціальних рівнянь та обчислювальної техніки.

Експериментальні дослідження проведені на виготовлених лабораторних установках з використанням швидкісної відеозйомки. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням положень теорії ймовірності та математичної статистики з використанням пакетів програм "Mathcad", "MatLab", "Excel". Для визначення оптимальних співвідношень конструктивно-технологічних параметрів розроблених ППП з об'ємною структурою застосована методика планування факторного експерименту. Виробнича апробація розроблених ППП з об'ємною структурою проведена у відповідності до діючих міжнародних і державних стандартів, методів натурних випробувань та імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше* встановлено функціональний взаємозв'язок між закономірностями продуктивності процесу сепарування СЗМ та параметрами ППП об'ємної структури за допомогою аналітичного моделювання, що дозволило кількісно технологічну ефективність та надійність сепарувального обладнання.

2. *Вперше* встановлені закономірності зміни власних частот коливань на напружень в ППП об'ємної структури за допомогою числового МКЕ моделювання, які оцінюють резонансні явища та визначають довговічність ППП.

3. Комплексно обґрунтуванні параметри ППП з ОЕ з врахуванням технологічних показників роботи сепарувальних машин і фізико-механічних властивостей компонентів СЗМ.

4. *Отримав подальший розвиток*: напрям моделювання поділу компонентів на ППП, який відрізняється врахуванням властивостей компонентів СЗМ, параметрів ОЕ.

5. *Удосконалено*: методи визначення програмованої ефективності процесу сепарування СЗМ на ППП, які доповнені критерієм надійності обладнання.

У дисертації вперше одержані наступні наукові результати:

1. На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень щодо збільшення технологічної ефективності та надійності сепарувального обладнання встановлено, що існуючі ППП не задовольняють зростаючі вимоги виробництва. Для цього запропоновано використати розроблені ППП об'ємної структури, які складаються з отворів та об'ємних елементів розташованих між ними, забезпечують інтенсивне просіювання компонентів СЗМ та поліпшують жорсткість конструкції. Виконання науково-технічного завдання з обґрунтування параметрів ППП потребує теоретичного та експериментального опрацювання, проведення оптимізації за критеріями продуктивність та надійність.

2. За допомогою розробленої гідродинамічної модель руху СЗМ, в якій ураховано псевдозрідження шару, «сухо-фрикційну» складову зсувних напружень, що дало змогу отримати узагальнені рівняння швидкості СЗМ та продуктивності плоских/циліндричних ППП об'ємної структури. Кількісна ідентифікація структурного ефекту ОЕ, врахування конструктивних та кінематичних параметрів ППП дозволила отримати: поля швидкості СЗМ кукурудзи/соняшнику - 0,47–0,61 м/с / 0,34–0,69 м/с, продуктивність ППП до 7,92 кг/с / до 4,41 кг/с. Вперше виявлено вплив типу профілю (трикутний, напівколо та прямокутний) та параметрів ОЕ на динамічні показники СЗМ, який запропоновано оцінювати через узагальнений коефіцієнт K_v .

3. Проведення числового стимуляційного моделювання дозволило провести КЕ-аналіз напружено-деформованого стану ППП об'ємної структури з варіацією її товщини, типу профілю та параметрів ОЕ, завантаженням шаром СЗМ. Досліджено показники надійності ППП через ідентифікацію напружень, частот власних коливань та витривалість конструкції. Встановлено, що зменшення товщини ППП (внаслідок абразивного зношення) підвищує пікові напруження в центральних та периферійних зонах, тоді як використання певних профілів (напівколо) здатне компенсувати та екстенсифікувати (до 31%) подібний ріст. Визначено мінімальні допустимі параметри, які гарантують витривалість і нерезонансність конструкції ППП.

4. Втомна перевірка надійності ППП з ОЕ полягала в комплексному використанні методу Гудмана та DAF із прив'язкою до власних частот коливань поверхонь. Встановлені граничні значення товщин ППП $h_{\min}=0,60-0,92$ мм, що забезпечують цільовий рівень $\sigma_{\max}\leq 0,6 \sigma_{\text{eff}}$ для ППП з рядним/шаховим розташуванням ОЕ та навантаженням СЗМ. Для практичного використання запроваджено та облічені поправочні коефіцієнти частот $K_{\text{pо}}$, що дозволяють перераховувати власні частот коливань від базових суцільних пластин до ППП з різними типами ОЕ та схемами їх розташування.

5. Для перевірки аналітичних та чисельних моделей, уточненню діапазонів варіювання параметрів створено комплексну експериментальну методику для ідентифікації динамічних, технологічних і ресурсних параметрів процесу сепарування СЗМ, яка базується на оригінальних розроблених лабораторних установках та високоточному вимірювальному обладнанні: високошвидкісної відеозйомка, модальному аналізу із застосуванням сенсорів РСВ та системи Simcenter Testlab 2019.1. Розроблені адаптовані методики визначення продуктивності, повноти поділу, швидкості руху компонентів та показників надійності ППП доповненні комплексними оціночними показниками (коефіцієнтами), які ураховують форми отворів, параметри об'ємну структуру ППП.

6. Експериментальними дослідженнями динаміки СЗМ за методом високошвидкісної відеозйомки встановлені діапазони швидкості шару СЗМ кукурудзи/соняшнику на плоских ППП: $0,093\dots 0,110$ м/с/ $0,0054\dots 0,0070$ м/с. Встановлено, що підвищення висоти ОЕ в дослідному діапазоні (до 4 мм) зменшує швидкість СЗМ до 23 % на плоских ППП і до 8% на циліндричних ППП. Відносна розбіжність між аналітичними та експериментальними результатами не перевищує 4,8 %, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі динаміки СЗМ. Встановлені залежності продуктивності ППП від їх конструктивно-кінематичних параметрів відповідають даним аналітичних моделей з розбіжністю 3,6%. Тривалими експериментальними дослідженнями встановлено, що розроблені ППП з ОЕ мають підвищений ресурс до 64,4 %

порівняно з базовими ППП, що підтверджує позитивний вплив конструктиву на показники надійності. Результати досліджень довели, що використання ППП об'ємної структури забезпечує комплексне підвищення продуктивності процесу сепарування СЗМ та поліпшення надійності.

7. В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу сепарування СМЗ за трирівневим планом Бокса–Бенкіна рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів плоскої ППП об'ємної структури: відносна висота ОЕ $h_r=0,46\dots0,51$; кількість підшарів СЗМ $N_L=4,5\dots5,5$; коефіцієнт проникності $\varepsilon=0,270\dots0,285$. Встановлено, що за визначеними параметрами максимальна продуктивність ППП становить $Q=0,030 - 0,039$ кг/с з перевіркою адекватності за критерієм Фішера (95 % довірчий рівень).

8. За результатами досліджень розроблено нормативно-технічну документацію на ППП об'ємної структури, яка впроваджена та використовується в серійному виробництві на ПрАТ «Харківпродмаш» (м.Харків) з річним економічним ефектом 126 тис.грн при річній програмі випуску 100 штук. Виробничими випробуваннями сепарувального обладнання модернізованого ППП об'ємної структури встановлено, що ефективність процесу сепарування СЗМ кукурудзи/соняшника підвищується на 20...30%, а довговічність ППП збільшується на 45-64%. Визначено, що інтенсифікація процесу сепарування СЗМ, за рахунок використання розроблених ППП об'ємної структури, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 11,1-19,4 % та 8,7-21,2 %, відповідно. Загальний щорічний економічний ефект від застосування модернізованих сепараторів у виробничих умовах СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області та на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області склав 203,1 тис. грн.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: огляд і аналіз стану

досліджень, визначення перспективних способів підвищення ефективності очищення отворів ППП; одержання математичної моделі динаміки СЗМ по розроблених ППП, обробка та аналіз результатів; експериментальна ідентифікація параметрів процесу сепарування СЗМ та обробка результатів; комплексне обґрунтування параметрів ППП з ОЕ та наведення рекомендацій щодо подальшого застосування розробки. Запропонована конструкція ППП з ОЕ та спосіб підвищення ефективності очищення отворів захищені патентами.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 11 наукових праць, з них: 3 статі у фахових виданнях України, 5 конференції, 2 патенти; 1 статті – в зарубіжних виданнях, що індексуються в науково-метричних базах Scopus або WOS. Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків, викладена на 245 сторінках машинописного тексту. Основний зміст роботи викладено на 166 стор., включаючи 42 рисунки та 29 таблиць. Список використаних джерел складається з 202 найменувань на 21 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Огляд досліджень процесів сепарування сипких зернових матеріалів

Серед ознак сепарування сипких зернових матеріалів (СЗМ) поширеною є поділ компонентів за розмірами, який виконується за допомогою перфорованих просіювальних поверхонь (ППП). Технологічний процес передбачає просіювання частини СЗМ через отвори ППП (проходова фракція) та вихід іншої частини, яка залишилася (сходова фракція). Інтенсивність сепарування СЗМ забезпечує вібрація у вигляді частоти та амплітуди коливань ППП.

Процес решітного сепарування містить наступні підпроцеси: переміщення СЗМ по робочій поверхні; сегрегація компонентів у шарі СЗМ; просіювання компонентів проходової фракції через отвори ППП і сходження з неї компонентів сходової фракції; очищення отворів ППП. Від інтенсивності протікання цих операцій залежить продуктивність і якість роботи, надійність сепарувального обладнання. Параметри вібрації позитивно впливають не тільки на процес сегрегації [1, 2], а й на просіювання СЗМ [3, 4].

Одним з головних технологічних завдань, яке ставиться до сепарувального обладнання, є реалізація поділу компонентів під час руху по ППП заданої довжини. Якщо компонент, який повинен був, але не встиг просіятися крізь отвори, то відбувається зниження якості поділу у вигляді показника – повноти поділу. Це вимагає наступні кроки: 1) зменшення питомого завантаження (товщини шару), що одночасно знижує продуктивність сепарувальної машини; 2) повторні пропуски СЗМ, що негативно відображається на надійності (довговічності) обладнання, перевитратам енергії та травмуванні компонентів.

Дослідженнями процесів сепарування компонентів сипких матеріалів займалися П.М. Заїка [5, 6], Л.М. Тищенко [7-9], В.В. Адамчук [10], Б.І. Котов [11-13], С.О. Харченко [14, 15], В.О. Шейченко [16, 17], С.П. Степаненко [18, 19],

В.П. Ольшанський [20, 21], Е.Б. Алієв [22, 23], С.В. Кюрчев [24], О.В. Цуркан [25], Є.В. Михайлов [26, 27], М.В. Бакум [28, 29], О.М. Васильковський [30, 31], В.В. Бредихін [32, 33], М.В. Півень [34, 35] та ін.

Конструкції ППП вельми різноманітні, проте їх можна згрупувати за певними ознаками. За кінематичним приводом ППП можна поділити на: вібраційні, відцентрові та вібровідцентрові. Визначення впливу кінематичних параметрів на ефективність процесів сепарування, оптимізація режимів відображені в роботах [8, 9, 14, 15, 23, 35].

Попередня обробка або підготовка СЗМ сприяє інтенсифікації процесу сепарування за рахунок: видалення частини компонентів; розпушенню шару, розшаруванню та збільшення сегрегації тощо.

Відділення крупних компонентів з СЗМ технічно забезпечується за рахунок використання розвантажувальних решет, які є першим ступенем в сепарувальних машинах [13, 20, 26]. Призначення подібної ППП полягає в розвантаженні наступного в технологічному процесі підсівного решета, яке відділяє дрібні домішки з СЗМ. Відділення крупних компонентів та спрямування їх одразу на колосове решето, дозволяє забезпечити кращі умови для просіювання дрібних компонентів та підвищити продуктивність сепарувальних машин до 40% [36]. Попереднє розшарування може виконуватися: за допомогою підготовчих неперфорованих [37, 38], повітропроникних [39] або ступінчастих [40, 41] поверхонь, з використанням спеціальних пристроїв [42, 43].

Важливим етапом сепарування є перерозподіл компонентів СЗМ з верхніх підшарів до ППП, за що відповідає сегрегація. Обмежена довжина ППП потребує інтенсивної реалізації цього перерозподілу, що дозволяє збільшувати товщину шару СЗМ та продуктивність сепарувальної машини.

Для поліпшення процесу сегрегації у вібровідцентровому сепараторі запропоновано встановлювати конічну обичайку, яка розділяє СЗМ на два потоки і сприймає тиск вище розміщених шарів [39, 44]. Це забезпечує рівномірне завантаження циліндричної ППП по довжині та покращує умови для сегрегації частинок нижнього шару.

Швидкість руху компоненту СЗМ частинки залежить від форми і розмірів пор, інтенсивності пошарового руху суміші, що характеризується градієнтом швидкості елементарних шарів за глибиною [15, 20, 35]. Тому очевидно, що кінематичні параметри ППП не тільки забезпечують рух СЗМ, а й впливають на показники сегрегації.

Вплив властивостей СЗМ (крупність та питома вага компонентів) на сегрегацію досліджено в [35]. Так, під час вібрації крупні компоненти опиняються над дрібними, а легкі над важкими. Занурення компоненту в СЗМ обумовлюють три фактори: відмінність її щільності від густини середовища; несиметрія сил опору та закону коливання середовища.

Таким чином, застосування попередньої обробки з видаленням або частковим поділом компонентів, інтенсивною сегрегацією дає змогу підвищити ефективність процесів просіювання СЗМ.

Сегрегація та просіювання компонентів СЗМ мають різні оптимальні параметри вібрації: частоту та амплітуду [20, 35]. Доведено, що наявний внутрішньосаровий рух в СЗМ залежить від щільності та геометричних розмірів компонентів.

Дослідження просіювання СЗМ довело значущість наступних факторів [15, 20, 35]: кінематичного режиму; кута нахилу та габаритів ППП; форми та розташування отворів; питомого завантаження; властивостей СЗМ матеріалу.

Динаміка СЗМ по перфорованим віброповерхням з просторовим рухом, з метою поділу їх компонентів, розглянута в роботах [45, 46]. Встановлено оптимальні (для просіюваності) режими руху ППП, отримано аналітичні вирази для кінематичних умов їх існування.

Розпушування шару СЗМ викликає збільшення пор та збільшує інтенсивність перерозподілу компонентів, що експериментально доведено в [35, 47]. Найбільш стійке розпушення і швидкість перерозподілу компонентів відбувається за амплітуд 0,6...0,7 мм і частоти коливань 1600...1800 кол/хв.

Використання циліндричних ППП та додаткової відцентрової сили, що діє на компоненти, здатне інтенсифікувати сегрегацію та просіювання [4, 7, 15, 18].

Для вертикальних циліндричних вібровідцентрових решіт, що здійснюють осьові коливання (у своїй площині), збільшення розпушеності досягається підвищенням частоти коливань решета.

Аналізуючи вищенаведене, очевидно, що оптимізацією режимних параметрів ППП можливо поліпшити якісні показники роботи сепараторів при сепаруванні компонентів СЗМ.

Серед відомих способів підвищення ефективності сепарації, шляхом псевдозрідження шару (подібно до пневмостолу), найдосконалішим є технологічне та конструктивне поєднання пневмомеханічних чинників, що реалізоване у вібропневмоцентрифугах [32, 39]. Використання енергії повітряного потоку дало змогу значно підвищити ефективність поділу насінневих сумішей та їх очищення від важковідокремлюваних домішок.

Рух СЗМ по перфорованим повітропроникним поверхням досліджено в [48]. Застосування повітряного потоку зменшує внутрішнє тертя суміші, збільшує ступінь розпушеності шару, що сприяє перерозподілу компонентів. Однак слід зауважити зворотній, негативний ефект впливу повітряного потоку відносно проходженню компонентів через отвори ППП.

Використання повітряного потоку для розпушування шару сипучого матеріалу, за одночасного накладення вібрацій забезпечує високі показники роботи, проте несе підвищення енерговитрат і ускладнює конструкцію.

Сепарування СЗМ на ППП супроводжується забиванням отворів частинками і потребує постійного їх очищення. Поліпшення якості очищення отворів ППП від застряглих компонентів підвищує ефективність процесу сепарування [49-51].

Очищення ППП здійснюється фрикційним способом, за якого робочі органи-очисники очищають отвори під час контакту із застряглими компонентами. Також застосовують ударний спосіб: а) робочі органи-очисники наносять удари по ППП, спричиняючи їхню вібрацію і розклинюючи застрягли компоненти; б) робочі органи (ударні еластичні елементи) вибивають застрягли компоненти зі сторони неробочої поверхні. Третій спосіб базується на

самоочищені отворів від застряглих компонентів за рахунок конструктивних особливостей отворів, заданих кінематичних режимів, використанні спеціальних пристроїв.

Один з прикладів самоочисної ППП є решето з гребінками, яке поширене в зерноочисних комбайнах [52, 53]. ППП складається з нахилених до горизонту гребінок, через які продувається повітряний потік. Поділ компонентів відбувається по аеродинамічним властивостям та розмірами (ширина відкритості щілини). Іншими ППП, сепарувальні отвори яких самоочищаються в процесі роботи, є роликові решета [6, 50]. Подібні конструкція ППП не потребують використання системи очищення від застряглих компонентів. Недоліками є: поділ за одним сепарувальним розміром компоненту (ширина), необхідність використання додаткового повітряного потоку або приводу (додаткові витрати енергії), реалізації виключно технологічної операції попереднього очищення СЗМ.

Удосконалення конструкції щіткових або ударних кулькових, комбінованих очисників становить позитивний вплив на повноту поділу компонентів СЗМ та продуктивність ППП [49, 51, 54, 55]. За допомогою щетини або гумових кульок відбувається своєчасне очищення ППП, що дозволяє мати максимальний «живий» її перетин.

Для підвищення ефективності сепарування СЗМ на вібровідцентрових ППП в [56] запропоновано спосіб очищення, який полягає в періодичному впливі робочих органів роторно-кільцевого очисника. Подібний очисник складається з еластичних ударних кілець і працює в періоді холостого режиму, що менше перешкоджає процесу просіювання компонентів через отвори ППП. В [57] досліджено очисник кільцевого типу циліндричних ППП, який встановлюється вільно із зазором. Коливання ППП призводять до переміщення центру ваги кілець навколо його осі, які натискаючи на застрягли частинки, виштовхують їх з отворів.

Показники проходження компоненту крізь отвори ППП безпосередню впливають на ефективність процесу сепарування СЗМ. Аналітична модель

просіювання компонентів СЗМ через отвори горизонтальної циліндричної ППП представлена в [58] і враховує фактори детермінованого характеру та елементи випадковості процесу, в тому числі рівень заблокованості отворів.

На підставі вищенаведеного можна зробити висновок, що поліпшення очищення отворів ППП у вигляді використання самоочисних конструкцій решет, їх відповідних кінематичних параметрів, удосконалених способів та конструкцій очисників, дає змогу підвищити ефективність сепарування СЗМ.

Сепарування СЗМ за розмірами супроводжується певними проблемами, коли сепарувальні параметри основного та домішкового компонентів співпадають. Подібну домішковий компонент СЗМ називають важковідокремлювальним, а його кількість не залежить від кількості технологічних пропусків через ППП [6, 20].

Також значущими факторами процесу просіювання компонентів СЗМ через отвори ППП є [15, 22]: характер та швидкість руху матеріалу, напрям та величина коливань. Ці фактори визначаються: кутом нахилу ППП до горизонту, коефіцієнтом тертя матеріалу по ППП, частотою та амплітудою коливань.

Інтенсифікація етапу просіювання компонентів СЗМ шляхом оптимізації кінематичних параметрів призводить до підвищення ефективності процесу сепарування на ППП.

Для підвищення просіюваності ППП низка дослідників вдалися до зміни її форми поверхні. В роботі [59] доведена ефективність використання криволінійних ППП для сортування СЗМ соняшнику, відмічено збільшення кількості прохідної фракції, встановлені оптимальні кінематичні параметри та радіус кривизни. Визначено оптимальні параметри плоскої ППП криволінійної форми за яких отримано збільшення кількості прохідної фракції соняшнику. Крім додаткового орієнтування компоненту в отвори при використанні криволінійної ППП спостерігається заданий рівномірний розподіл СЗМ всією сепарувальною поверхнею. Однак слід зауважити, що ефективність подібної ППП залежить від заданих властивостей і для компонентів округлої форми може

вносити суттєві зміни щодо швидкості руху СЗМ по поверхні, часу тривалості сепарування і, в кінцевому випадку, продуктивності ППП.

Криволінійна щілинна ППП досліджена в [60], де авторами визначено вплив початкової швидкості руху СЗМ та радіусу її кривизни на ефективність сепарації за умови самоочищення щілин.

Серед факторів, які впливають на процеси сепарування СЗМ слід відмітити [15, 35]: сепарувальну величину та форму отвору; характер коливання решіт (повздовжнє, поперечне, кругле); величина нахилу ППП.

Дослідження впливу форми отвору ППП на ефективність просіювання компонентів СЗМ наведені в [14, 15]. Авторами доведено позитивний вплив зміни типової форми отвору на складну епіциклоїдну форму, що дозволило отримати підвищення ефективності сепарування СЗМ на 30-100%. Використання складної форми отвору у вигляді овалу Кассіні досліджено в [61, 62]. Авторами також відмічено позитивний вплив використання отворів складної геометрії на ефективність просіювання насіння кукурудзи.

Використання на ППП додаткових елементів у вигляді ребер або повздовжніх рифлів дозволило підвищити продуктивність плоскорешетного сепаратора на 20-25% при очищенні насінневого та продовольчого СЗМ пшениці [63]. Використання розрихлювачів [64] та сегрегаторів [65] їх позитивний вплив на збільшення пористості шару СЗМ та інтенсивність пошарового руху компонентів відмічено авторами.

Таким чином, зміна форми поверхні решета, параметрів отворів та їх кромки веде до інтенсифікації сепарації СЗМ і підвищення ефективності використання ППП.

На підставі аналізу наявних досліджень можна виділити наступні способи інтенсифікації процесу сепарування СЗМ: поліпшенням підготовчого етапу, інтенсифікацією внутрішньшарового руху компонентів, поліпшенням очищення отворів та інтенсифікацією етапу просіювання через отвори.

1.2. Огляд конструкцій перфорованих просіювальних поверхонь

Процес сепарування СЗМ залежить від інтенсивності пошарового руху компонентів, яка пов'язана з пористістю середовища. Це створює необхідність у використанні відповідних деталей та пристроїв: розпушувачів, сегрегаторів і т.п.

В [34, 35] для утворення радіально-осьових дій в шару СЗМ з робочої сторони ППП на перемичках наварені ободи – ребра (рис.1.1, а). Це дозволяє збільшити пористість та інтенсивність просіювання компонентів через отвори. В [66] представлено аналітичні дослідження сегрегації СЗМ на ППП з ребрами у вигляді привареної металевої проволочки або проштамповані рифлі (рис.1.1, а, б). Встановлені закономірності пористості і швидкості пошарового руху СЗМ.

Одним зі способів інтенсифікації сепарування СЗМ є профілювання ППП. Для підвищення ефективності просіювання СЗМ в роботах [6, 20, 67, 68] автори відзначають позитивний вплив використання ППП гофрованого типу та з лункоподібними отворами (рис.1.1, в, г). При коливанні, гофри або виступи лунок взаємодіють з компонентом СЗМ та направляють, орієнтують його в отвори за сепаруючим розміром (товщиною або шириною). Подібні конструктивні рішення не потребують змін в сепараторі та орієнтують компоненти СЗМ в отвори, що суттєво активізує просіюванність ППП.

Більш досконалою та технологічною, з точки зору промислового виготовлення, є використання ППП з об'ємними активаторами (рис.1.1, д) [69, 70]. Шахове розташування об'ємних активаторів на ППП дозволяє багатократно взаємодіяти з компонентами СЗМ. Параметри об'ємних елементів обрано відповідно до розмірів компоненту, за умови компромісу між орієнтуванням до отвору та опором повздовжнього руху шару СЗМ. Підвищення просіювання компонентів СЗМ кукурудзи на даних ППП склало до 30%.

Для інтенсифікації просіювання в [14, 15] досліджено ППП з отворами складної геометрії у вигляді епіциклоїди (рис.1.1, е). Подібна форма дозволяє нівелювати природньо-технологічні відхилення форм та розмірів компонентів, збільшити кількість прохідної фракції по відношенню до типових форм отворів (круглих, трикутних).

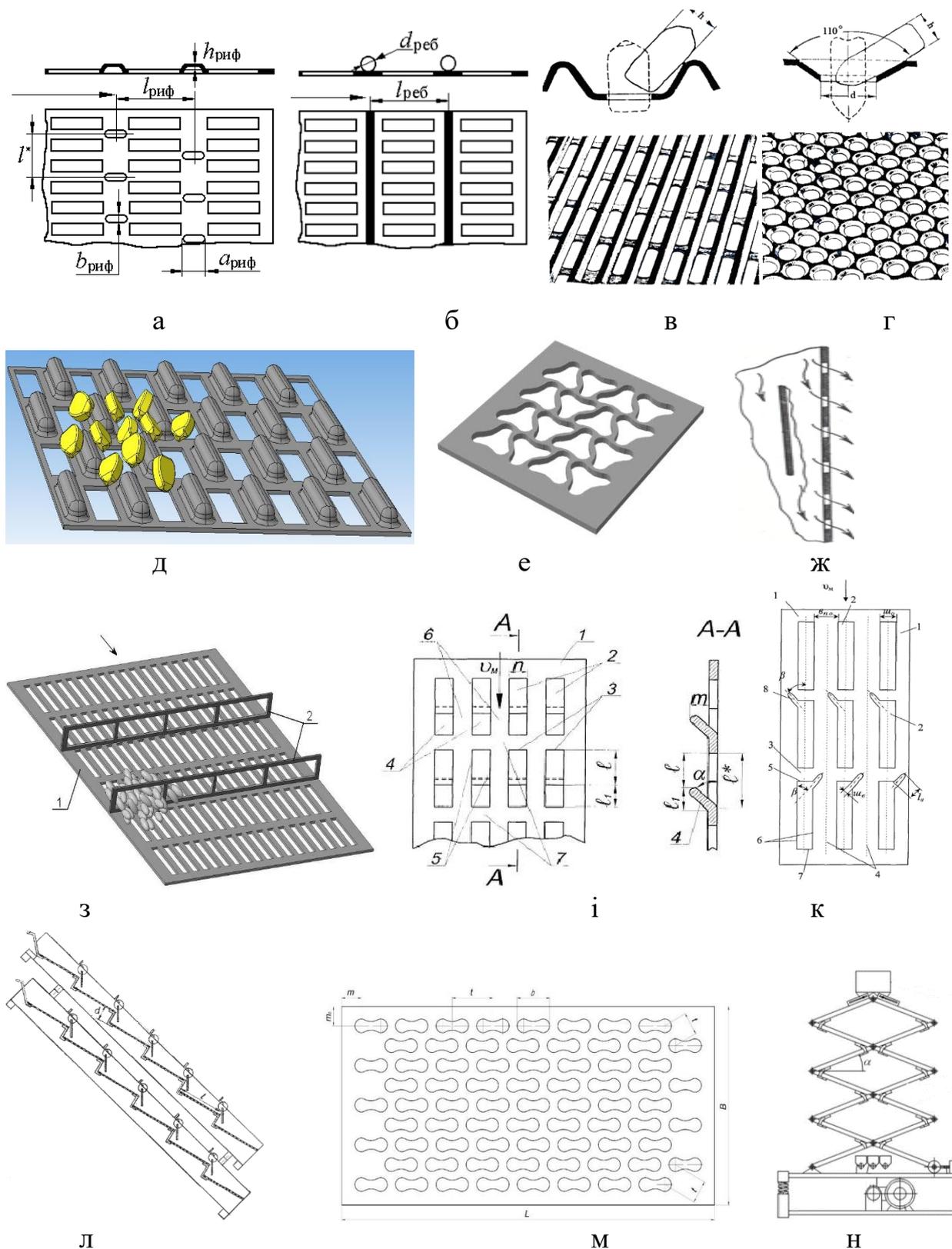


Рисунок 1.1 – Конструкції ППП: а – з рифлями; б – з привареними ребрами; в – гофровані поверхні; г – з лункоподібними круглими отворами; д – з направляючим конусом на циліндричній ППП; е – з епіциклоїдними отворами; ж – з об’ємними активаторами; з – з решетчастими сегрегаторами; і – з інтегрованими крайками отворів; к – з пазовими активаторами; л – з планками м – з отворами у вигляді овалу Кассіні; н – з ножичним розташуванням

Моделювання динаміки СЗМ проведено за гідроаналогією, отримане підвищення ефективності сепарування на 30-100%.

Для вирівнювання товщини шару СЗМ, який рухається по вібровідцентровій циліндричній поверхні, запропоновано використовувати конус (рис.1.1, ж) [69]. Встановлено, що рівномірний розподіл СЗМ по довжині ППП покращує умови просіювання та збільшує продуктивність сепаратора.

Використання решетчастих сегрегаторів (рис.1.1, з) досліджено в [65, 71, 72]. Сегрегатори виконані у вигляді решіток, які встановлені перпендикулярно до ППП. За рахунок стискання і розширення шару СЗМ в сегрегаторі відбувається інтенсивна поява пор та поліпшується просіюваність ППП.

Самоочищення отворів ППП реалізується в роботі [73], де задні країки отворів виконані подовженими і відігнутими донизу на величину, яка дорівнює ширині прямокутного отвору (рис.1.1, і). Компоненти СЗМ, товщина яких більша ширини отворів, тільки частково занурюються в них і переміщуються по бокових до задніх крайок. Відігнуті країки виштовхують подібні компоненти СЗМ з отворів, виключаючи можливість їх заклинювання. Це забезпечує самоочищення отворів та підвищення продуктивності ППП.

Для орієнтування компонентів СЗМ до отворів ППП в [74, 75] запропоновано використовувати пазові активатори (рис.1.1, к). Для цього на крайках отворів виконуються профільні надрізи, які направляють компоненти (що рухаються по перемичках) в отвори. Інший варіант реалізації даного способу полягає у використанні крайчастих активаторів [76].

Для керування та активізації перемішуванням компонентів в [77] запропонована ППП зі встановленими каскадними кутовими планками (рис.1.1, л). Над кожним кутовим з'єднувачем розташований набір пластин, маятниково та незалежно встановлених на кронштейні, встановленому на рамі корпусу. Сумарна ширина пластин у наборі відповідає ширині сегмента ППП.

Для підвищення ефективності просіювання СЗМ кукурудзи в [61, 62] запропоновано використовувати ППП з отворами у вигляді овалу Кассіні (рис.1.1, м). Авторами запропоновано комбінування форми отвору та об'ємну

структуру ППП: плоскі, рифлені та увігнуті. При цьому також варіювалося розташування отворів на ППП: шахове, рядне, ялинкове та здвоєне ялинкове.

Підвищення продуктивності сепараційного обладнання також можна отримати шляхом компактного ножичного розміщення ППП секціях-важелях (рис.1.1, н) [78]. Отримані раціональні параметри і режими роботи механізму приводу сепаратора, для забезпечення коливань ППП та кулькових очисників.

Одним із напрямів удосконалення конструкцій решіт є заміна перемичок між отворами на струни [79, 80]. Це веде до значного збільшення "живого перерізу" та в деяких випадках призводить до підвищення продуктивності поділу компонентів СЗМ. Переважно дослідниками використовується кругла поперечна форма перерізу струн, що також позитивно відображається на орієнтуванні компонентів до утворених сепарувальних щілин. Мінімальний контакт округлих струн з компонентами утворює менші сили тертя та поліпшує динаміку СЗМ.

Струнні ППП порівняно з штампованими мають більший робочий (живий) перетин але значно поступається в якості поділу компонентів, складній конструкції, необхідності постійного налаштування (натягування).

Таким чином, використання додаткових елементів у вигляді розпушувачів, сегрегаторів, активаторів та ін. на ППП веде до інтенсифікації внутрішньосферних процесів, збільшенню пористості, орієнтуванню компонентів до отворів, що в кінцевому результаті поліпшує ефективність сепарування СЗМ. Однак більшість наявних конструкцій мають складну конструкцію, вузьке призначення, недостатню ефективність на засмічених та вологих СЗМ, потребують додаткового сервісу та налаштування.

Іншим рішенням для інтенсифікації сепарування СЗМ, підвищення повноти розділення запропонували ППП хвилеподібної форми, виготовлену шляхом штампування [81]. СЗМ переміщується за рахунок коливань по хвилеподібній поверхні, у якій повздовжні вісі хвиль розташовані перпендикулярно напрямку руху ЗС. При русі СЗМ компоненти систематично піднімаються і опускаються на висоту хвиль, змінюючи положення своїх осей відносно отворів ППП.

За формою робочої поверхні ППП проділяють на плоскі та об'ємні, серед яких поширеними є циліндричні, які використовуються в барабанних або відбровідцентрових сепараторах.

Переваги циліндричних ППП над плоскими полягають у наявності інерційних (відцентрових) сил, що дозволяють збільшити площу контакту компонентів з сепарувальною поверхнею, поліпшити їх просіювання через отвори та підвищити ефективність сепарування [7, 15, 56, 64, 70].

Дослідження підвищення ефективності сепарування СЗМ на циліндричних решетах за рахунок збільшення розпушеності шару повітропроникними лускатими поверхнями представлені в [11-13, 19, 82].

Розпушення шару СЗМ також може виконуватися різними конструктивними елементами, наприклад, спіралеподібними лопатками або шнеками (рис.1.2, а) всередині циліндричної ППП [83]. Під час роботи спіраль сприяє розпушенню СЗМ та інтенсивному підходу прохідних компонентів до сепарувальної поверхні та подальшому просіюванню.

Встановлення рифлів на робочій стороні циліндричної ППП запропоновано в [84] (рис. 1.2, б). СЗМ, який рухається та попадає на рифлі розпушується та переміщується, що інтенсифікує сегрегацію компонентів та просіювання СЗМ.

Для збільшення ефективності сепарування СЗМ в [85] запропоновано на внутрішній поверхні циліндричного решета встановлювати лопатки-розпушувачі (рис.1.2, в). Лопатки встановлені під кутом до осі решета і інтенсифікують сегрегацію та рух СЗМ.

Конструкція конусної ППП [86] для забезпечення самоочищення та можливості поділу СЗМ на декілька фракцій та підвищення коефіцієнт використання робочого часу на 8-12 % складається з щілиноподібних отворів виконаних з розширенням в напрямку руху оброблюваного СЗМ (рис.1.2, г). В [87] авторами запропоновано на внутрішній поверхні ротора циліндричного решета спіраль у вигляді лопаток (рис.1.2, д). Лопатки, завдяки своїм параметрам, призначені для розбиття оболонок насіння та одночасного переміщення та рівномірного розподілення СЗМ по сепарувальній поверхні.

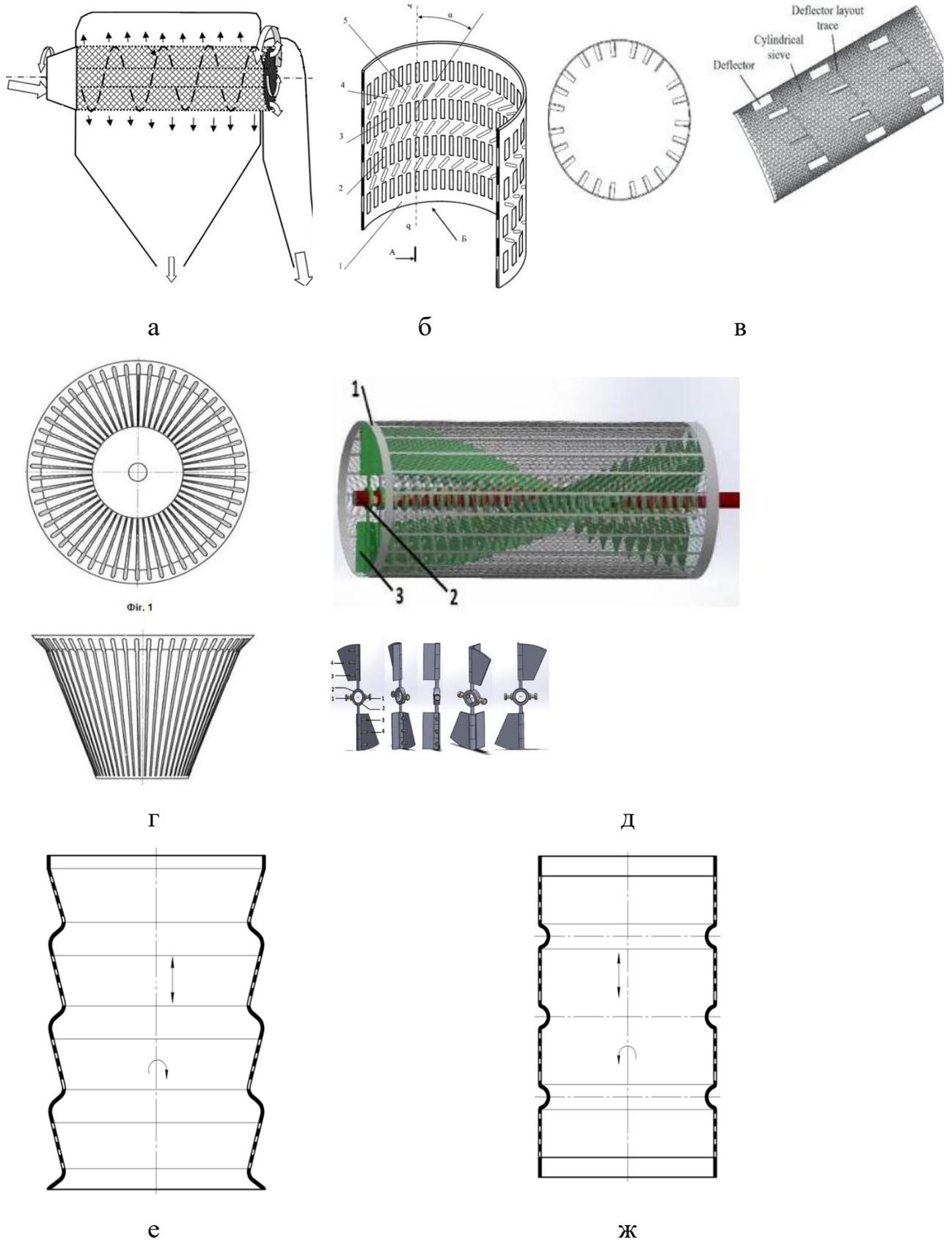


Рисунок 1.2 – Конструкції циліндричних ПДП

Одним з конструктивних рішень стало використання циліндрично-ступінчастого решета [41, 88] (рис. 1.2, е). Перехід СЗМ з однієї ступені на другу відіграє роль інтенсифікатора, що перемішує середовище та збільшив його пористість сприяє переміщенню дрібних компонентів. Крім того при роботі з плоскими компонентами СЗМ подібні ступінчасті виступи частково орієнтують їх в отвори. Авторами доведено збільшення питомої продуктивності ППП до 20 % в порівнянні з типовою циліндричною ППП.

Іншим способом підвищення ефективності процесу сепарування СЗМ є використання циліндричної ППП з неперфорованими гофрованими ділянками з робочої сторони (рис.1.2, ж) [89]. При русі ЗСМ по гофрам відбувається розпушування підшарів і інтенсивне проникнення дрібних часток до поверхні решета, а потім — просіювання їх крізь отвори.

Певну систематизацію технічних засобів з інтенсифікації внутрішньосхарових динамічних процесів в СЗМ проведено Л.М. Тищенком [7-9, 63, 66, 72, 90-93]. В рамках його школи розроблено інтенсифікатори трьох типів: динамічні, поверхневі та об'ємні інтенсифікатори, які сприяють розпушенню СЗМ за оптимальних для просіювання кінематичних параметрів. Впровадження інтенсифікаторів на ППП дозволило підвищити технологічні показники продуктивності та якості сепарувального обладнання.

Аналіз використання пасивних елементів на ППП показує, що поруч з позитивними моментами перерозподілу дрібних компонентів, спостерігається негативні моменти: інтенсивне перемішування підшарів СЗМ, складнощі технічного розміщення та додатковий його сервіс.

Підсумуванням наведеної інформації є позитивне застосування розпушувачів і сегрегаторів, профілювання робочих поверхонь що дає змогу інтенсифікувати процеси поділу компонентів СЗМ.

Таким чином, проведений аналіз дозволив систематизувати та класифікувати конструкції ППП з урахуванням інноваційних способів підвищення ефективності процесів сепарування СЗМ (рис.1.3) [94].

Основними відмінними ознаками стали: за способом виготовлення, за розташуванням робочої поверхні, за рухомістю робочої поверхні, за використанням додаткових елементів, за формою отворів, за формою робочої поверхні, за розташуванням отворів, за технологічною операцією, за розміром отворів, за матеріалом з якого їх виготовлено.

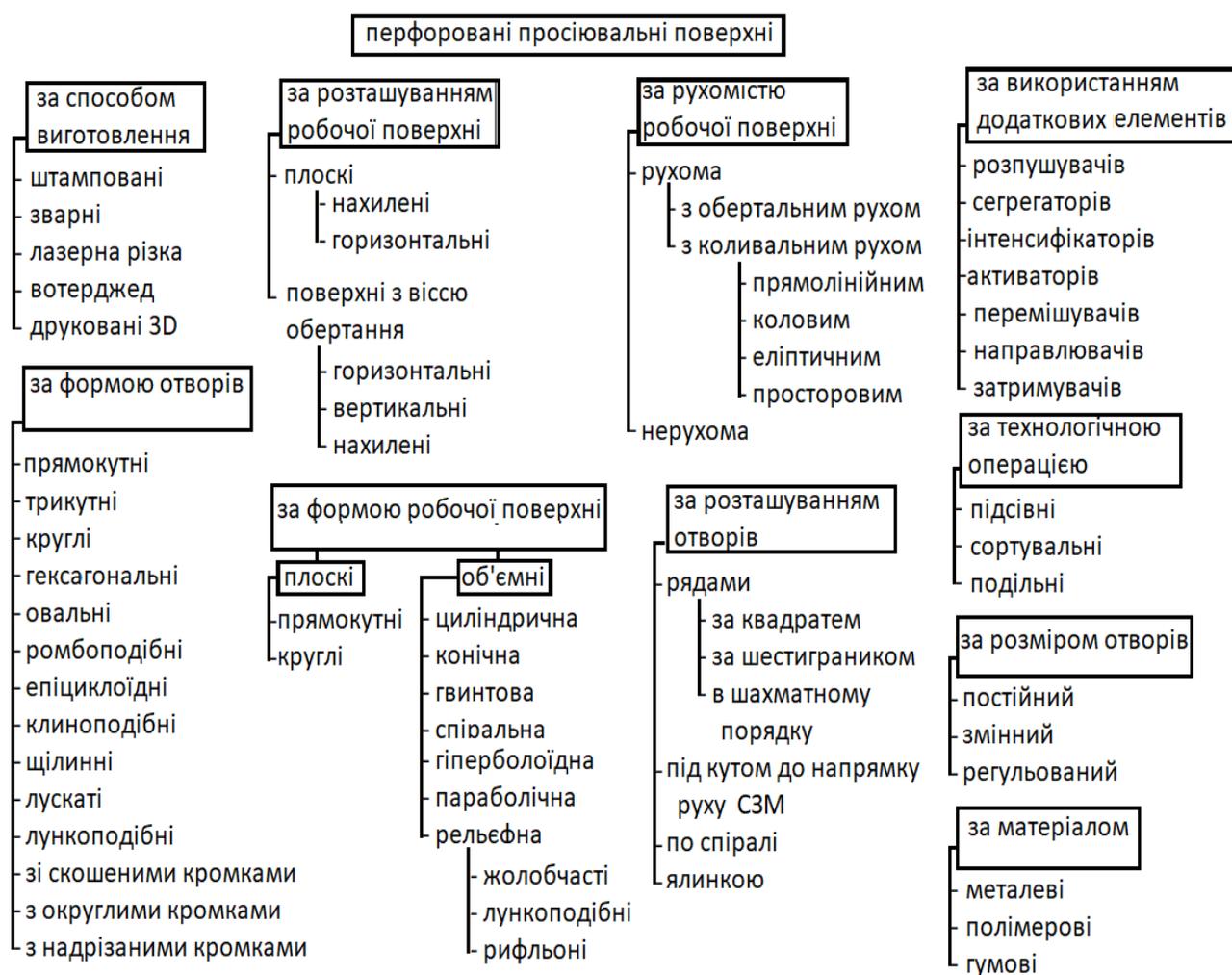


Рисунок 1.3 – Класифікація конструкцій ППП

1.3. Постановка науково-технічного завдання

Підвищення ефективності сепарації СЗМ на ППП реалізується за рахунок інтенсифікації проходження компонентів прохідової фракції з верхніх шарів до сепарувальної поверхні. Запропонований спосіб [95, 96] включає: рівномірну

подачу вихідного СЗМ по ширині ППП, переміщення його вздовж ППП з просіюванням компонентів прохідової фракції через його отвори та надходження у приймачі продуктів розділення. Під час переміщення по ППП СЗМ примусово розшаровують в залежності від розміру компонентів з одночасним перерозподілом крупних компонентів до верхнього шару, середніх за розміром компонентів у проміжні шари, а дрібних компонентів у нижній над сепарувальною поверхнею шар за рахунок об'ємних елементів-рифлів, які розташовані на перемичках між отворами решета і виконані різної висоти.

На перемичках ППП між отворами розташовують об'ємні рифлі (виступи) які мають дві різні висоти, що дозволяє виконувати поділ СЗМ на три фракції за розмірними групами компонентів вихідного матеріалу (рис.1.4). Крупні компоненти відокремлюються і переміщуються по високих рифлях у верхньому шарі СЗМ, а меншого розміру компоненти – перерозподіляються і переміщуються безпосередньо по сепарувальній поверхні. В кожному рядкові отворів ППП, чергування висоти рифлів однакове, а між рядами отворів воно зміщене, що забезпечує як постійний процес розшарування компонентів СЗМ, так і переміщення відсортованих фракцій окремими шарами.

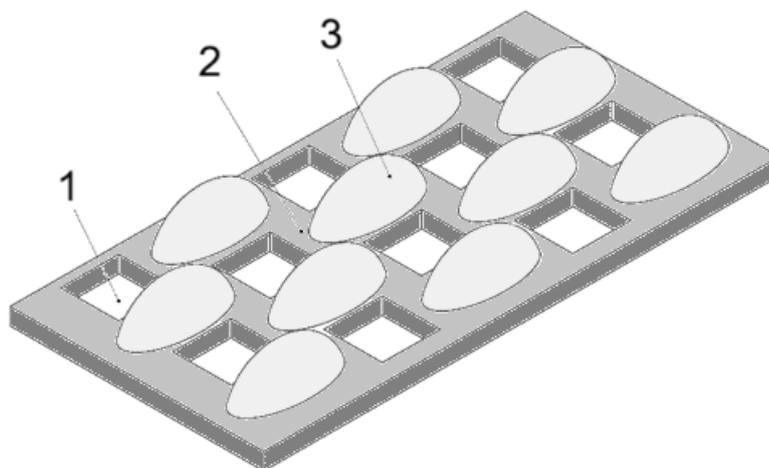


Рисунок 1.4 – Схема ППП з об'ємною структурою:

1 – отвір, 2 – перемичка, 3 – риф

Запропонована ППП з об'ємною структурою встановлюється в рішотний стан і не потребує змін в конструкції сепараторів. Утворений перерозподіл сприяє відведенню з зони сепарування (простір біля ППП) крупні компоненти СЗМ, тим самим, звільняючи дрібним компонентам шлях до отворів, через які вони просіваються. Крупні компоненти СЗМ рухаються по верхніх рифлях до сходової фракції.

Аналіз досліджень показав відсутність теоретичного визначення динамічних показників СЗМ при русі по ППП з об'ємною рифленою структурою. Таким чином є необхідність проведення відповідного моделювання, експериментальних досліджень та визначення раціональних параметрів за критеріями технологічної ефективності (продуктивність та якість сепарування СЗМ) та надійність ППП.

1.4. Показники ефективності сепарувального обладнання

Очищення, обробка та переробка СЗМ супроводжуються у багатьох технологічних лініях використанням сепарувальних обладнання. До подібних матеріалів відносяться харчові та сільськогосподарські матеріали (крупни, борошно, зерно, добрива і т.п. [97]

Основними робочими органами універсальних машин для післязбиральної очистки СЗМ є пробивні ППП, інтенсивність просюювання крізь отвори яких визначає загальну продуктивність і якість процесу сепарування.

На продуктивність сепаратора впливають [24, 42, 64]: конструктивні (розмір і форма отворів, відсоток їх перфорації) та кінематичні (амплітуда та частота коливань решета,) параметри ППП, фізико-механічні властивості СЗМ (вологість, щільність, коефіцієнт форми і т.п.), технологічні (швидкість подачі СЗМ, його дисперсний склад компонентів, рівень засміченості і т.п.).

Аналітично продуктивність сепаратора можна визначити за формулою [20]:

$$Q = \frac{G}{t} = \rho A v E, \quad (1.1)$$

де Q – продуктивність, кг/с; G – маса просіяного компоненту СЗМ, кг; t – час процесу сепарування СЗМ, с; ρ – щільність СЗМ, кг/м³; A – площа ППП, м²; v – швидкість переміщення шару СЗМ, м/с; E – повнота поділу компонентів.

Якість поділу СЗМ характеризується повнотою відділення основного компонента від домішкового [20]:

$$E = \frac{G_{\text{прос}}}{G_{\text{зар}}}, \quad (1.2)$$

де $G_{\text{прос}}$ – маса цільового компоненту після просіювання; $G_{\text{зар}}$ – маса СЗМ до сепарації.

Фактори, що впливають на продуктивність сепараторів можна звести до наступних [98]: тип СЗМ k_1 , рівень засміченості k_2 та вологість матеріалу k_3 . Конструктивні особливості сепарувального обладнання, що впливають на регулювання, налаштування та обслуговування, можна оцінити за коефіцієнтом використання технологічного часу k_4 .

Фактичну технологічну продуктивність сепарувальної машини, з урахуванням наведених коефіцієнтів можна визначити за виразом [98]:

$$Q_{\text{ф}} = k_1 k_2 k_3 k_4 Q_{\text{п}}, \quad (1.3)$$

де $Q_{\text{п}}$ – паспортна продуктивність сепаратора за годину основного часу роботи, т/год.

Значне засмічення СЗМ ускладнює процеси сегрегації компонентів у шарі та просіювання їх через отвори ППП. Вплив рівня засміченості на продуктивність сепараторів доведено в [99, 100] та відображено через коефіцієнт k_2

Попри значущість, аналіз [98] показує, що коефіцієнт має широкий діапазон (0,14...1,67) та не може бути використаний для наукових та інженерно-практичних цілей.

Таким чином, ідентифікація нових показників та їх використання в науково-дослідній, проектувальній та експлуатаційній сферах дозволить забезпечити адекватне корегування технологічної продуктивності сепарувального обладнання.

Використання інноваційних форм отворів в ППП [101, 102] дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сепарування СЗМ та збільшити технологічні показники сепарувальних машин. Проте питання надійності подібних ППП розглянуто недостатньо, що обмежує широке практичне використання новацій.

Під час експлуатації ППП зазнають постійного контакту та абразивного навантаження від СЗМ [103, 104]. Найбільш поширеними є базові ППП з круглими, трикутними або продовгуватими отворами [20, 105, 106]. Проте подібна геометрія з використанням кутових форм (прямокутник або трикутник) утворює концентрацію напружень, що призводить до передчасного руйнування через втому. Другим негативним фактором є абразивні властивості сипкого матеріалу, який протягом експлуатації зменшує товщину, та, відповідно жорсткість конструкції [104]. Це призводить до появи деформацій у вигляді тріщин між отворами та інтенсивному зниженню якості поділу компонентів. Поява тріщин є граничним технологічним показником якості роботи ППП [104].

Присутня вібрація на ППП інтенсифікує сегрегацію компонентів в середині шару, поліпшує динамічні характеристики сипкого матеріалу, проте також утворює негативні дії щодо надійності решета [20]. Наявні вимушені та власні коливання решет з базовими та інноваційним отворами/рифлями були частково досліджені в роботах [107, 108]. Авторами відмічено, що використання ППП з отворами складної геометрії дозволяє зменшити локальні напруження, підвищити жорсткість і продовжити ресурс елементів. Зміна концентраторів напруження в області отворів була досліджена в [109] для базових трикутних форм та трипелюсткових епіциклоїдних. Частково подібні висновки прослідковуються в роботах [104, 110], які відзначають впливовість геометрії отворів у забезпеченні надійності та зносостійкості решіт.

Основними показниками довговічності ППП є напруження до граничного стану та інтенсивність зношування робочої поверхні. Також важливим аспектом надійності ППП є уникнення резонансних режимів, що виникають при збігу частоти зовнішніх (вимушених) коливань з власними частотами ППП. У випадку резонансу відбувається різке зростання амплітуди коливань, що спричиняє

локальні перевантаження та прискорене руйнування конструкції. Власна частота коливань ППП може бути виражена через:

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.4)$$

де ω_0 – власна частота коливань; k – жорсткість системи; m – маса ППП.

Для забезпечення надійності обладнання необхідно дотримуватися умови відсутності резонансу: $\omega_0 \neq \omega$, де ω – частота вимушених коливань ППП.

Крім того, отвори ППП, як зазначено вище, виступають концентраторами напружень, що знижують їх довговічність. Локальні напруження у зоні отворів можуть бути визначені за виразом:

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom}, \quad (1.5)$$

де σ_{max} – максимальні локальні напруження в зоні отворів; σ_{nom} – номінальні напруження від дії навантаження; K_t – коефіцієнт концентрації напружень, що залежить від геометрії перфорації та співвідношення розмірів отворів до товщини ППП. Таким чином, врахування резонансних явищ та ефектів концентрації напружень є необхідною умовою для підвищення надійності та довговічності решетних сепараторів.

Таким чином, поєднаний аналіз технологічної продуктивності (при нормованій повноті поділу) та довговічності ППП (у вигляді показників частоти власних коливань та концентраторів напружень) забезпечує комплексну оцінку ефективності процесу сепарування СЗМ.

1.5. Висновки за розділом, постановка мети та завдання дослідження

1. На підставі аналізу результатів досліджень обґрунтовано актуальність проблеми підвищення продуктивності сепарувального обладнання внаслідок недостатньої ефективності роботи ППП при розділенні відмінних за розмірами компонентів СЗМ сільськогосподарських культур.

2. Проведений аналіз дозволив удосконалити існуючі та запропонувати нову класифікацію ППП для поділу компонентів СЗМ за розмірами.

3. Перспективним напрямком інтенсифікації процесу сепарування СЗМ є використання ППП з об'ємною рифленою структурою шляхом: забезпечення розпушування шару та інтенсивності внутрішньшарового руху компонентів, відділення та переміщення з зони просіювання крупних компонентів СЗМ, забезпечення надійності конструкції.

4. Проведеним аналізом доведена відсутність теоретичних досліджень процесу сепарування СЗМ на ППП з об'ємною рифленою структурою, як динаміки середовища, так і надійності конструкції ППП.

В результаті аналізу стану поставленого завдання з підвищення продуктивності сепарувального решетного обладнання розроблено ППП з варіативними рифами та різним їх розміщенням, що утворюють об'ємну структуру та інтенсифікують процес сепарування компонентів СЗМ.

Визначена тема дисертаційної роботи і сформульована її мета: підвищення ефективності процесу сепарування СЗМ за рахунок обґрунтування параметрів ППП з об'ємною рифленою структурою.

Відповідно до поставленої мети для вирішення проблеми намічені завдання: провести оцінку і аналіз існуючих підходів до підвищення ефективності процесів сепарування СЗМ на ППП; виконати аналітично-експериментальне визначення динамічних характеристик СЗМ, встановити закономірності зміни швидкості компонентів СЗМ на ППП з урахуванням властивостей компонентів СМ, конструктивно-кінематичних та технологічних параметрів ППП; виконати визначення показників надійності ППП; обґрунтувати критерії оптимізації процесу сепарування СЗМ, запропонувати цільову функцію та визначити раціональні конструктивні параметри ППП з об'ємною рифленою структурою; виконати оцінку впливу параметрів ППП на ефективність процесу сепарування СЗМ, надійність її конструкції; провести експериментальне визначення фізико-механічних властивостей компонентів СЗМ та ступінь їх впливу на ефективність процесу сепарування; виконати оцінку

адекватності та ефективності отриманих залежностей ефективності ППП сепарувального обладнання шляхом перевірки в умовах виробництва.

Розв'язок цих завдань дасть можливість створити наукові положення та методи досліджень процесу сепарування СЗМ, і сумісно з підприємствами с.г. машинобудування виготовити, випробувати і впровадити в серійне виробництво розроблені ППП з об'ємною рифленою структурою.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ СИПКИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НАДІЙНОСТІ ПЕРФОРОВАНИХ ПРОСІЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

2.1. Динаміка сипких зернових матеріалів на перфорованих просіювальних поверхнях

Технологічні характеристики вібраційного решетного сепарувального обладнання залежать від динамічних показників компонентів СЗМ, які мають складні траєкторії та прецензійне просіювання крізь отвори. Створення адекватних математичних моделей динаміки СЗМ дозволить визначити складові швидкості компонентів та управляти продуктивністю/якістю процесу сепарування.

2.1.1. Підходи математичного моделювання динаміки сипких матеріалів.

Класичні підходи моделювання динаміки СЗМ відображені в роботах Неддермана Р.М. [111], Гортинського В.В. [112], Заїки П.М. [6], Блехман І. [113], Рістова Г. [114], Дурана І. [115] та базуються переважно на визначенні динамічних показників матеріальної точки по ППП, встановленню ймовірності просіювання крізь отвори і т.п. Подібні аналітичні моделі [113, 116, 117] спираються на класичну механіку та враховують динаміку матеріальної частинки масою m , яка рухається по похилій ППП, що здійснює гармонічні коливання:

$$x_s(t) = A_x \sin(\omega t), y_s(t) = A_y \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

де A_x, A_y – амплітуди коливань, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота.

При цьому на частинку СЗМ діють [113, 117-119]: вага $P = mg$; інерційні сили від руху ППП $F_{ix} = -m\ddot{x}_s(t), F_{iy} = -m\ddot{y}_s(t)$; нормальна реакція поверхні

$N = m(g\cos\alpha + \ddot{y}_s(t)\cos\alpha - \ddot{x}_s(t)\sin\alpha)$; сила тертя $F = \mu N$, де α – кут нахилу решета, μ – коефіцієнт тертя.

Рівняння руху частинки по поверхні:

$$m\ddot{x} = -F_t\cos\alpha - m\ddot{x}_s(t), m\ddot{y} = N - mg - m\ddot{y}_s(t). \quad (2.2)$$

Подібні підходи не враховує впливи зіткнень/тертя з іншими компонентами СЗМ та елементами конструкції, що призводить до зниження точності моделювання.

Оскільки сипкі матеріали характеризуються хаотичною взаємодією між частинками, чисто аналітичні моделі часто потребують доповнення емпіричними коефіцієнтами. Іншими методами моделювання є напівемпіричні підходи, які моделі враховують [121]: коефіцієнт відновлення ударів частинок СЗМ, ефективний коефіцієнт тертя, коефіцієнт розпушення (шпаруватості) шару.

Середня швидкість руху частинок СЗМ може бути описана виразом:

$$v_{avg} = kf(A_x, \omega, \alpha, \mu), \quad (2.3)$$

де k – експериментально визначені коефіцієнти.

Одним з недоліків даного методу є достосованість результатів моделювання лише до властивостей заданих СЗМ та конструктивно-кінематичних параметрів сепаратора, що утруднює широке застосування отриманих даних.

Сучасні підходи моделювання включають методи дискретного елементного моделювання (DEM) [22, 23, 122, 123], де частинки СЗМ моделюються як тверді тіла, що взаємодіють силами пружності та тертя.

Загальне рівняння руху частинки СЗМ масою m_i і моментом інерції I_i має наступний вигляд:

$$m_i\ddot{r}_i = \sum_{j \in C_i} F_{ij} + m_i g + F_i^{ext}, \quad (2.4)$$

$$I_i\dot{\omega}_i = \sum_{j \in C_i} T_{ij} + T_i^{ext}, \quad (2.5)$$

де r_i , ω_i – положення центру та кутова швидкість частинки СЗМ, відповідно; C_i – множина контактних частинок СЗМ; $F_{ij} = F_{ij}^n + F_{ij}^t$ – сила від контакту з частинкою СЗМ, включно з нормальною (F_{ij}^n) і дотичною (F_{ij}^t) компонентами; T_{ij} – момент від контакту (переважно від дотичної сили); F_i^{ext} , T_i^{ext} – зовнішні сили

та моменти, відповідно; $I_i = \frac{2}{5} m_i R_i^2$ – момент інерції для частинки СЗМ радіуса R .

Для моделювання зіткнень застосовуються переважно моделі Герца–Міндліна, а для тертя – кулонівська модель. Попри широкі можливості DEM у врахуванні конструктивних та кінематичних параметрів ППП, товщини шару, реологічних властивостей СЗМ, адекватність даних моделей залежить від точності поправочних коефіцієнтів з попередніх експериментальних досліджень.

Перспективними підходами моделювання руху СЗМ слід вважати гідродинамічну аналогію, коли зернове середовище розпушене під дією вібрації та може бути розглянуто як рідина [124]. В такому стані динаміку СЗМ можна описати не через дискретні частинки, а як квазінеперервне середовище, що підпорядковується рівнянням типу Нав'є–Стокса [8, 9, 125, 126].

Дана методика базується на двох основних виразах [14, 64]:

- рівняння безперервності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0, \quad (2.6)$$

- рівняння імпульсу

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \sigma + \rho g + F_v, \quad (2.7)$$

де ρ – щільність СЗМ; u – вектор середньої швидкості СЗМ; ∇ – дивергенція потоку маси; p – тиск шару СЗМ, що виникає від взаємодії частинок; σ – тензор внутрішніх напружень; F_v – сила від вібраційної ППП.

Гідродинамічний підхід на основі рівнянь безперервності (2.6) та імпульсу (2.7), дає можливість описати колективний рух частинок СЗМ на вібраційній ППП. Підхід забезпечує компактний інструмент для аналітичного та подальшого чисельного аналізу процесів, що суттєво спрощує оцінку параметрів сепарації та дозволяє узагальнювати результати для різних режимів роботи сепарувального обладнання [20, 35, 127].

Дослідження сегрегації компонентів в шарі СЗМ, як значущим фактором

ефективності процесу сепарування, наведені в роботах [35, 112]. Використані методи базувалися на дискретизації шару у вигляді пластин з наявним тертям між ними [112] та аналогії з гідросередовищем [35], що дозволило встановити градієнти швидкості частинок за глибиною шару СЗМ.

Інтенсивність пошарового переміщення (сегрегація) компонентів в СЗМ визначає ефективність сепарування. Даний фізичний підпроцес залежить від показників взаємодії між частинками СЗМ, товщини та швидкості руху шару.

Взаємодія частинок СЗМ визначається гідродинамічними силами, силами сухого тертя (в'язкого опору) і т.п. Тоді, динаміка частинки СЗМ може бути описана рівнянням [4]:

$$m_1 \ddot{z} = m_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) (g - \dot{u}) + F_c, \quad \text{2ю} \quad (2.8)$$

де m_1 , m_0 – відповідно, ефективна маса частинки та шару СЗМ; ρ , ρ_0 - відповідно, щільність частинки та шару СЗМ; z , \dot{u} – відповідно, переміщення і відносна швидкість частинки СЗМ; F_c – сила опору частинки СЗМ.

Іншим значущим фактором є вплив параметрів ППП на динамічні показники компонентів СЗМ, які можуть бути враховані через граничні умови [35, 127]: на нижній межі задається швидкість/прискорення поверхні, враховується наявність ОЕ, які утворюють опір рух, рівень перфорації та умова не проникнення на перегородках, форма та період розміщення отворів і т.п.

Таким чином, аргументами вибору аналітичної методики гідродинамічної аналогії для моделювання руху СЗМ є: отримання узагальнених динамічних показників (профіль тиску, швидкості) для значної кількості частинок що контактують; точність розрахунків та адекватність даних; зручність оптимізації констуктивно-кінематичних параметрів процесу сепарування СЗМ.

2.1.2. Модель динаміки сипкого зернового матеріалу на плоскій перфорованій просіювальній поверхні об'ємної структури.

Тенденції з підвищення питомого завантаження ППП, а відповідно і товщину шару СЗМ, призводить до пошуку нових науково-технічних. Використання ППП з об'ємною структурою дозволяє інтенсифікувати підпроцес сегрегації компонентів в шарі, їх просіювання через отвори та, в кінцевому випадку, призводить до підвищення ефективності сепарування СЗМ.

Дія ОЕ на рухомий СЗМ призводить до інтенсивного утворення пор та збільшення пористості шару [128]. Зміна реології СЗМ впливає безпосередньо на його динамічні показники. На відміну від існуючих підходів моделювання руху СЗМ на ППП [8, 20, 129]. пропонується врахування пористості та впливу параметрів ОЕ на динаміку компонентів.

Частково питання зміни пористості СЗМ при його сепаруванні розглянуто в працях [8, 35, 127, 130, 131], де використано методи чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь або прийнято дотичні напруження пропорційними швидкості деформації зсуву.

Для визначення зміни пористості скористаємося моделлю нелінійної реології для гранульованих матеріалів, які знаходяться у псевдозрідженому стані [132]. Ця модель ґрунтується на припущенні, що дотичне напруження є квадратичною функцією від швидкості зсувної деформації, що, в свою чергу, дозволяє враховувати перехід СЗМ з квазітвердого стану у вібророзріджений режим. В цьому випадку поряд із в'язким опором діє залишкове сухе тертя між компонентами СЗМ. Також особливістю цієї моделі є можливість відображення нелінійного характеру зміни напружень у потоці з урахуванням інерційності, фрикційних взаємодій та колізій, що робить її придатною для аналізу високонавантажених систем і опису поведінки СЗМ у динамічних умовах, зокрема на вібруючих плоских ППП.

Прийmemo схему (рис.1) для опису руху СЗМ з товщиною h по плоскій ППП, яка має розміри $L \times B$, нахилена під кутом α , коливається з амплітудою A та

круговою частотою ω . СЗМ рухається по ППП уздовж осі $0x$, а компонент домішковий просіюється через отвори рухаючись за віссю $0y$. Вісь x направлена уздовж руху, y – нормаль до ППП.

Основне рівняння, що визначає дотичні напруження в СЗМ згідно [129] має вигляд:

$$\frac{d\tau}{dy} = \rho g \sin\alpha, \quad (2.9)$$

де $\rho = \rho_p C(y)$ – щільність СЗМ; ρ_p – густина матеріалу компоненту; $C(y)$ – концентрація компонентів в шарі СЗМ:

$$C(y) = 1 - \varepsilon(y), \quad (2.10)$$

де $\varepsilon(y)$ – пористість СЗМ, яка фізично визначається через співвідношення об'єму порот між окремими твердими частинками до загального об'єму шару середовища.

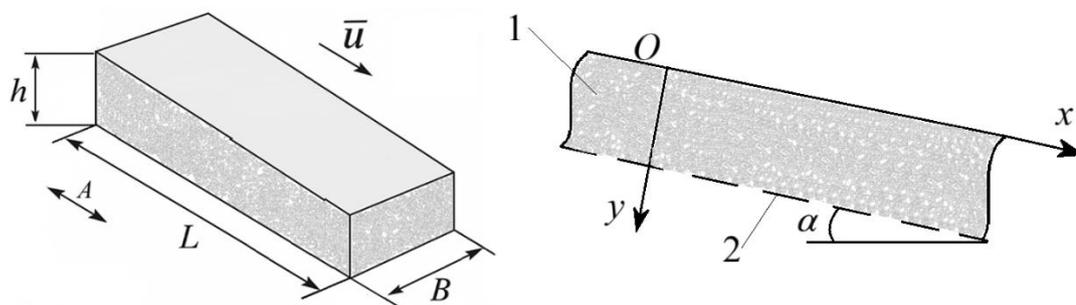


Рисунок 2.1 – Схеми руху СЗМ по вібраційній плоскій ППП: 1 – сипкий зерновий матеріал; 2 – просіювальна поверхня

Прийmemo умову $\tau(0) = 0$, тоді після інтегрування (2.9) маємо:

$$\tau(y) = \rho_p g \sin\alpha \int_0^y C(t) dt. \quad (2.11)$$

Далі прийmemo, що дотичне напруження зсуву складається з інерційно-колізійної складової (Bagnold-подібної) та «сухо-фрикційної» частини, пропорційної локальному надлишковому тиску СЗМ. Тоді реологічний зв'язок (Севідж/Bagnold) для лінійно-узагальненого опису зсувної напруги у розрідженому за допомогою вібрації шарі сипкого середовища:

$$\tau(y) = \mu \frac{du}{dy} + fp(y), \quad (2.12)$$

де μ – ефективна в'язкість середовища; $fp(y)$ – «сухо-фрикційний» внесок, пропорційний локальному надлишковому тиску.

Для прийнятих умов з урахуванням [129] маємо:

$$\tau(y) = \tau_0(y) \operatorname{sign} \left(\frac{du}{dy} \right) + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \operatorname{sign} \left(\frac{du}{dy} \right), \quad (2.13)$$

де $\tau_0(y) = fp(y)$, f – коефіцієнт сухого тертя; $p(y)$ – локальний надлишковий тиск у шарі СЗМ.

Слід зауважити, що $\mu \geq 0$, $f \geq 0$. У рівнянні (2.12) множник $\operatorname{sign} \left(\frac{du}{dy} \right)$ забезпечує коректний напрям τ відносно градієнта швидкості, а доданок $fp(y)$ виступає як локальна «границя плинності», що зростає зі збільшенням ущільнення та зменшенням пористості.

В (2.12) ми бачимо виділені пороговий (тертя/ущільнення) та кінетичний (інерційний) внески. У граничних випадках:

- при малих швидкостях деформації $\frac{du}{dy} \rightarrow 0$ напруження прямує до $\tau_0(y)$ (панує сухе тертя);
- при великих $\frac{du}{dy}$ домінує квадратичний закон.

Локальний надлишковий тиск у шарі СЗМ визначається за виразом:

$$p(y) = \rho_p g \cos \alpha \int_0^y C(t) dt. \quad (2.14)$$

Вздовж напрямку ковзання на елементарний об'єм СЗМ діє складова сили ваги $\rho_p g \sin \alpha$ та сила сухого тертя $f \rho_p g \cos \alpha$, спрямована проти руху. Тоді результуюче тангенціальне навантаження на глибині y , можна подати у вигляді:

$$\tau(y) = \rho_p g \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - f) \int_0^y C(t) dt, \quad (2.15)$$

де знак і величина $(\operatorname{tg} \alpha - f)$ доводять умову ковзання ($\operatorname{tg} \alpha > f$), а множник $\cos \alpha$ робить явною проєкцію на нормаль до ППП.

З іншого боку, відповідно до прийнятої моделі нелінійної реології для гранульованих середовищ, що перебувають у псевдозрідженому стані, зсувна напруга є квадратичною функцією від градієнта швидкості деформації:

$$\tau(y) = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^2. \quad (2.16)$$

Порівнюючи вирази (прирівняємо праві частини рівнянь (2.15) і (2.16) та після перетворень отримуємо:

$$\mu \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = \rho_p g \cos\alpha (\operatorname{tg}\alpha - f) \int_0^y C(t) dt. \quad (2.17)$$

В урахуванням напрямку руху СЗМ (рис.2.1) та виділяючи похідну швидкості маємо рівняння, яке показує залежність локального градієнта швидкості у шарі від інтегрального розподілу концентрації компонентів $C(t)$:

$$\frac{du}{dy} = \sqrt{\left[\frac{\rho_p g}{\mu} \cos\alpha (\operatorname{tg}\alpha - f) \int_0^y C(t) dt \right]}. \quad (2.18)$$

Для спрощення введемо нове позначення:

$$D = \frac{\rho_p g}{\mu} \cos\alpha (\operatorname{tg}\alpha - f). \quad (2.19)$$

Тоді (2.18) з урахуванням (2.19) має вигляд:

$$\frac{du}{dy} = \sqrt{D \int_0^y C(t) dt}. \quad (2.20)$$

Для розв'язання (2.20) задаємо крайову умову на нижній межі шару ЗС (поверхня решета), що враховує швидкість ковзання ЗСМ по ППП та фіксує константу інтегрування при переході від градієнта швидкості $\frac{du}{dy}$ до профілю швидкості:

$$u(h) = u_s, \quad (2.21)$$

де u_s – швидкість ковзання СЗМ по ППП, що визначається контактною взаємодією «шар-ППП».

Інтегруючи (2.20) з урахуванням крайової умови (2.21) отримуємо «квадратурний» (інтегральний) розв'язок задачі Коші [133]:

$$u(y) = u_s + \int_y^h \sqrt{D \int_0^y C(t) dt} dy. \quad (2.22)$$

Щоб перейти до обчислюваної форми, дотримуючись підходу з [134] приймаємо квадратичну апроксимацію розподілу концентрації компонентів за товщиною шару СЗМ:

$$C(y) = C_0(1 + a_1\xi + a_2\xi^2), \quad (2.23)$$

де C_0 – базова концентрація СЗМ; a_1, a_2 – безрозмірні параметри, що задають нахил і кривизну профілю, а їх значення х значення пов'язано з кінематичними та конструктивними параметрами ППП; $\xi = \frac{y}{h}$.

Згідно з працями [35, 130, 131, 135] маємо:

$$a_1 = 0,3483 \left(\frac{\rho_p g h^3 \cos \alpha}{2C_0 K_V \psi} \right)^{0,5263}; \quad a_2 = 0,6797 \left(\frac{\rho_p g h^3 \cos \alpha}{2C_0 K_V \psi} \right)^{0,5263}; \quad (2.24)$$

де $\psi = \frac{\sqrt{1+\varphi^2}-\varphi}{\varphi}$ – коефіцієнт, значення якого залежать від амплітуди та частоти коливань ППП та від коефіцієнта внутрішнього тертя f_0 в СЗМ в стані спокою, де $\varphi = \frac{f_0}{2} \left(1 + e^{-\frac{A\omega^2}{g}} \right)$; K_V – коефіцієнт структурності ППП, який характеризує вплив ОЕ на динамічні показники руху СЗМ; C_0 – початковий рівень концентрації.

Після підстановки квадратичної апроксимації концентрації (2.23) у «квадратурний» розв'язок (2.22), внутрішній інтеграл обчислюється явно, що дозволяє отримати інтеграл без вкладення (корінь від кубічного полінома):

$$u(y) = u_s + \int_y^h \sqrt{DC_0 \left(t + \frac{a_1}{2h} t^2 + \frac{a_2}{3h^2} t^3 \right)} dt. \quad (2.25)$$

Аналітична первісна $\sqrt{t + \frac{a_1}{2h} t^2 + \frac{a_2}{3h^2} t^3}$ не є неелементарною, тому застосовано серійне (біноміально-подібне) наближення підкореневого виразу в (2.25):

$$\sqrt{t + \frac{a_1}{2h} t^2 + \frac{a_2}{3h^2} t^3} \approx \sum_{n=0}^N b_n t^{\frac{1}{2}+n}, \quad (2.26)$$

де коефіцієнти b_n – результат біноміально-подібного наближення (за малості «кривизни» профілю). У файлі прямо зазначено використання «часткової суми ряду» та обмеження кількістю доданків у правій частині.

Інтегрування по членах і збереження трьох перших доданків дає робочу апроксимацію:

$$u(y) \approx u_s + \int_y^h \sqrt{DC_0} \left(B_0 y^{\frac{3}{2}} + B_1 y^{\frac{5}{2}} + B_2 y^{\frac{7}{2}} \right), \quad (2.27)$$

де $B_i = \frac{b_i}{\frac{3}{2}+i}$.

Введемо додаткові позначення $I = \frac{a_1}{2h}$ та $J = \frac{a_2}{3h^2}$, а розклад у (2.26) взяти до t^2 , щоб у (2.27) з'явилися степені до $y^{\frac{7}{2}}$.

Тоді маємо вирази для визначення коефіцієнтів мають вигляд:

$$b_0 = 1, b_1 = \frac{I}{2}, b_2 = \frac{J}{2} - \frac{I^2}{8} \Rightarrow \begin{cases} B_0 = \frac{2}{3}, \\ B_1 = \frac{a_1}{10h}, \\ B_2 = \frac{a_2}{21h^2} - \frac{a_1^2}{112h^2}. \end{cases}$$

Тоді швидкість руху СЗМ по ППП за умови $y \in [0, y]$ має вигляд:

$$u(y) = u_s + \sqrt{DC_0} \left[B_0 y^{\frac{3}{2}} + B_1 y^{\frac{5}{2}} + B_2 y^{\frac{7}{2}} \right],$$

або в кінцевому вигляді

$$u(y) = u_s + \sqrt{DC_0} \left[\frac{2}{3} y^{\frac{3}{2}} + \frac{a_1}{10h} y^{\frac{5}{2}} + \left(\frac{a_2}{21h^2} - \frac{a_1^2}{112h^2} \right) y^{\frac{7}{2}} \right]. \quad (2.28)$$

Визначення коефіцієнту структурності

Коефіцієнт структурності K_V вводиться для феноменологічного врахування впливу ОЕ плоскої ППП на реологію та динаміку СЗМ у вібраційному полі. Він узагальнює ефект інтенсифікаторів [35, 130], активаторів [136], повітропроникних лускатих елементів [137, 138] тощо, які змінюють пористість шару, локальні напруження зсуву та профіль швидкостей, а відтак – кінцеві показники швидкості ковзання, просіювання й продуктивності ППП.

У нашій моделі K_V входить до параметризації профілю концентрації (та, відповідно, пористості) і безпосередньо впливає на «сухо-фрикційний» внесок у напруження зсуву та на інерційно-колізійний режим течії Бенъольда–Севіджа, що відображено в (2.23)–(2.25), (2.12)–(2.14).

Коефіцієнт структурності K_V в (2.24) використовується для узагальненого обліку впливу ОЕ ППП на структуру шару СЗМ, що проявляється через зміну його пористості (концентрації) та, як наслідок, динамічних показників його руху.

Проте його існуюче аналітичне обґрунтування є узагальненим та не може в необхідним ступені бути використане для ППП з різними ОЕ.

У даній постановці вважаємо $K_V = const$ за товщиною шару для фіксованого режиму коливань. Крім цього, густина компонентів СЗМ (ρ_p) також не залежить від y . Тоді (2.9) можна представити у вигляді:

$$\frac{d^2C}{dy^2} \frac{dC}{dy} = \frac{\rho g C \cos \alpha}{2K_V \psi}. \quad (2.29)$$

Введемо додаткове позначення $\frac{dC}{dy} = \lambda$ та перетворимо (2.29) до вигляду:

$$\lambda^2 \frac{d\lambda}{dC} = \frac{\rho g C \cos \alpha}{2K_V \psi}. \quad (2.30)$$

Виконаємо інтегрування (2.30) та маємо:

$$\lambda^3 = \frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{K_V \psi} C^2 + \zeta. \quad (2.31)$$

За прийнятою початковою умовою $\left. \frac{dC}{dy} \right|_{y=0} = 0$ розв'язання (2.30)

відбувається при:

$$\zeta = -\frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{K_V \psi} C_0^2.$$

Тоді маємо:

$$\lambda = \left[\frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{K_V \psi} (C^2 - C_0^2) \right]^{1/3}. \quad (2.32)$$

Отримана диференціальна залежність (2.29)-(2.32) доводить зв'язок між концентрацією частинок C і глибиною шару y на ППП. Щоб знайти, як саме змінюється концентрація C всередині шару СЗМ по мірі заглиблення y , ставиться задача Коші: диференціальне рівняння з початковою умовою $C(0) = C_0$.

Після інтегрування (2.32) маємо:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{\sqrt[3]{C^2 - C_0^2}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{K_V \psi}} y. \quad (2.33)$$

Для спрощення вигляду рівняння введемо безрозмірну змінну $\phi = \frac{C}{C_0}$,

завдяки чому отримуємо:

$$V(\phi) = \int_1^\phi \frac{d\phi}{\sqrt[3]{\phi^2 - 1}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{K_V \psi} C_0} y. \quad (2.34)$$

Проблема полягає в тому, що інтеграл у (2.34) є невласний і не виражається через елементарні (синус, логарифм і т.п.) функції. Один з можливих варіантів є обчислення чисельно на комп'ютері.

Інтегрування (2.34) частинами дозволяють отримати наступне:

$$V(\phi) = \frac{3}{2} \left[\frac{(\phi-1)^2}{\phi+1} \right]^{1/3} + \frac{1}{2} \int_1^\phi \left[\frac{(\phi-1)}{(\phi+1)^2} \right]^{2/3} d\phi. \quad (2.35)$$

Це розділяє інтеграл на аналітичну частину (перший доданок) і залишковий інтеграл. Оскільки навіть залишковий інтеграл є громіздкий для розрахунків попередньо обчислено $V(\phi)$ для діапазону ϕ , побудовано графік (рис. 2.2). З графіку видно, що $V(\phi)$ зростає зі збільшенням ϕ , що відповідає фізичному ущільненню шару СЗМ.

Для зручності рівняння (2.10) можна перетворити на наступне:

$$\varepsilon = 1 - \phi C_0. \quad (2.36)$$

Для ідентифікації концентрації компонентів (C , C_0) в шарі СЗМ використаємо експериментальну методику, яка базується на фотозйомці розпушеного шару та статистичну обробку зображень [35].

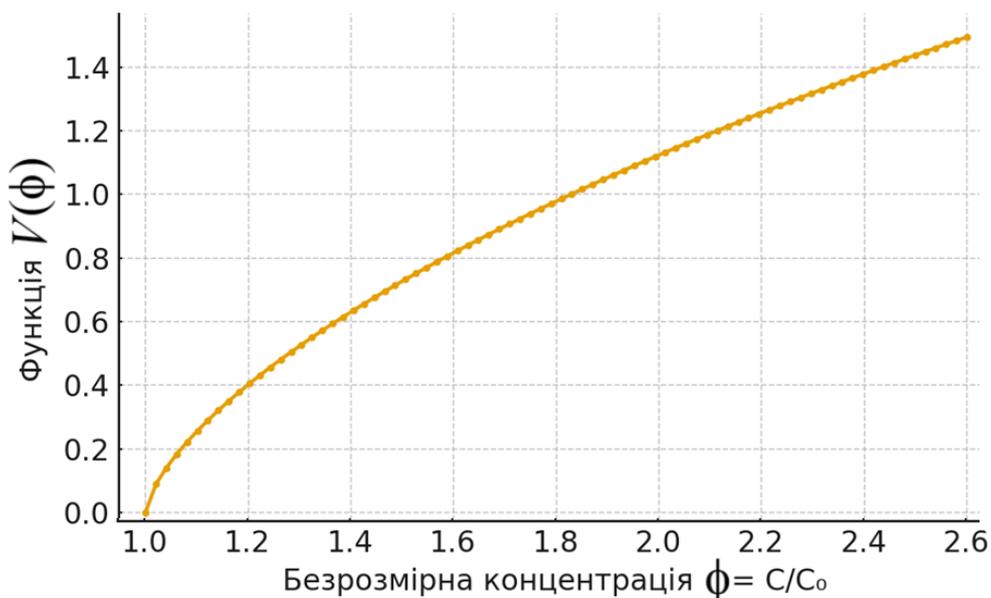


Рисунок 2.2 – Залежність $V(\phi)$ від коефіцієнту концентрації ϕ

Далі представлену залежність (рис.2.2) використовуємо для визначення коефіцієнту структурності при умові, що $y = h$. Тоді, з рівняння (2.34) знаходимо коефіцієнт структурності:

$$K_V = \frac{3}{4} \frac{\rho g \cos \alpha}{c_0 \psi} \left(\frac{h}{V(\phi)} \right)^3, \quad (2.37)$$

де $V(\phi)$ знаходимо з графіку (рис.2.2) за визначеним попередньо значенням ϕ ;

$\psi = \frac{\sqrt{1+\phi^2}-\phi}{\phi}$ – емпіричний коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати,

$$\phi = \frac{f_0}{2} \left(1 + e^{-\frac{A\omega^2}{g}} \right).$$

За встановленими експериментально концентраціями (C, C_0) облічимо ϕ та за графіком (рис.2.2) та визначаємо коефіцієнт $V(h)$.

Визначення продуктивності плоскої перфорованої просіювальної поверхні

У прийнятій постановці продуктивність ППП задається інтегральним виразом [20]:

$$Q = \rho_p B \int_0^h C(y) u(y) dy, \quad (2.38)$$

де B – ширина ППП (рис.2.1); $u(y)$ – профіль швидкості шару; $C(y)$ – концентрація (частка цільової фракції в шарі). Така форма узгоджується з кінематичною схемою руху й дозволяє прямо врахувати як мікроструктуру (через $C(y)$), так і реологію/кінематику (через $u(y)$).

Використавши (2.23), (2.24) та (2.27) виконавши перетворення (2.38) маємо кінцевий вираз для визначення продуктивності ППП:

$$Q = DC_0 \sqrt{C_0} \rho_p B h^{\frac{5}{2}} \left[\begin{aligned} & \frac{2}{5} + \frac{3}{7} a_1 h + \frac{1}{3} \left(a_2 + \frac{a_1^2}{4} \right) h^2 + \\ & + \frac{a_1}{22} \left(3a_2 - \frac{a_1^2}{2} \right) h^3 + \frac{3}{52} a_2 (a_2 - a_1^2) h^4 \end{aligned} \right] + \quad (2.39)$$

$$+ \rho_p h B C_0 u_0 (1 + a_1 h + a_2 h^2).$$

де a_1 і a_2 визначаються за (2.24).

Чисельне обчислення отриманої математичної моделі динаміки проведено при наступних вихідних даних, які отримані експериментально або запозичені з

відомих даних [6, 8, 20, 35, 127]:-параметри ППП $L=1\text{м}$; $B = 1\text{м}$; $A=0,0075\text{ м}$; $\omega=41,86\text{ рад/с}$; $\alpha=8\text{ градусів}$; властивості СЗМ кукурудзи - $\rho_p = 1200\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $f_0=0,4$; $h=0,02\text{м}$; $C_0=0,28$; СЗМ соняшнику $\rho_p = 1000\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $f_0=0,3$; $h=0,014\text{м}$; $C_0=0,38$.

В результаті обчислення отримані графічні залежності коефіцієнту структурності від амплітуди та частоти коливань ППП (рис.2.3, 2.4). Для практичного застосування результатів проведено обчислення динамічних показників для СЗМ кукурудзи та соняшнику.

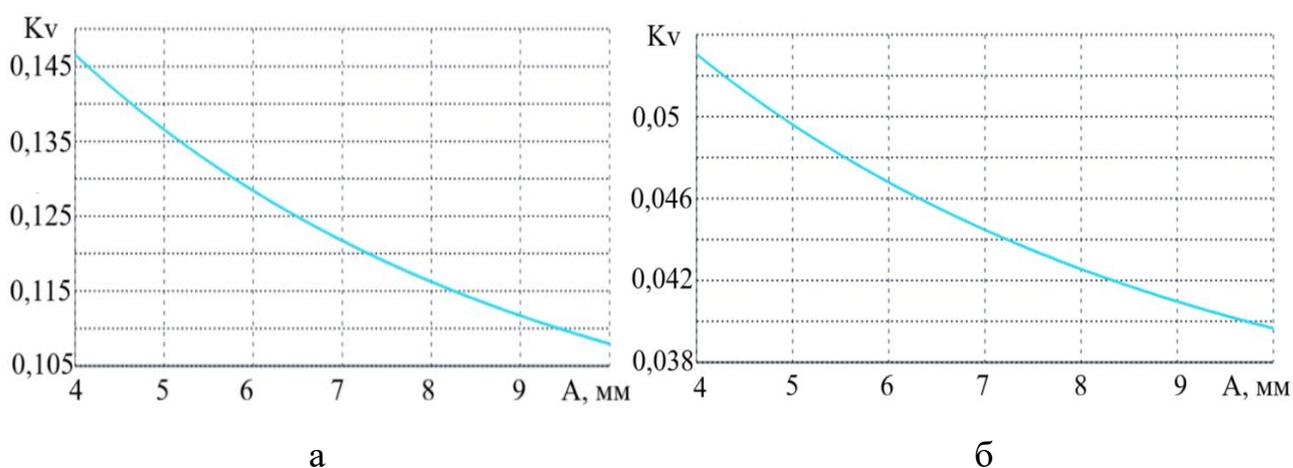


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнту структурності від амплітуди коливань ППП: а – СЗМ кукурудзи ; б – СЗМ соняшнику ($\omega=41,86\text{ рад/с}$)

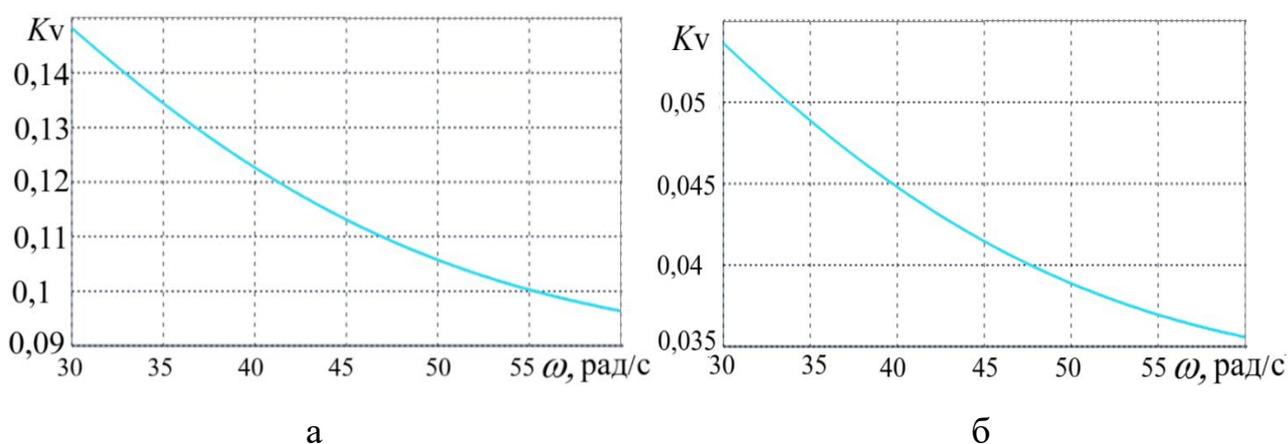


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнту структурності від частоти коливань ППП: а – СЗМ кукурудзи; б – СЗМ соняшнику ($A=7,5\text{ мм}$)

Аналізом залежностей (рис.2.3, 2.4) встановлено нелінійність зміни коефіцієнтів структурності при варіюванні кінематики ППП. Збільшення кінематичного навантаження ППП, в діапазонах характерних для сепарувального обладнання, призводить до зниження даного коефіцієнту на 29,7-36,7%.

Для визначення впливу коефіцієнта структурності на швидкість руху СЗМ побудовані залежності (рис.2.5).

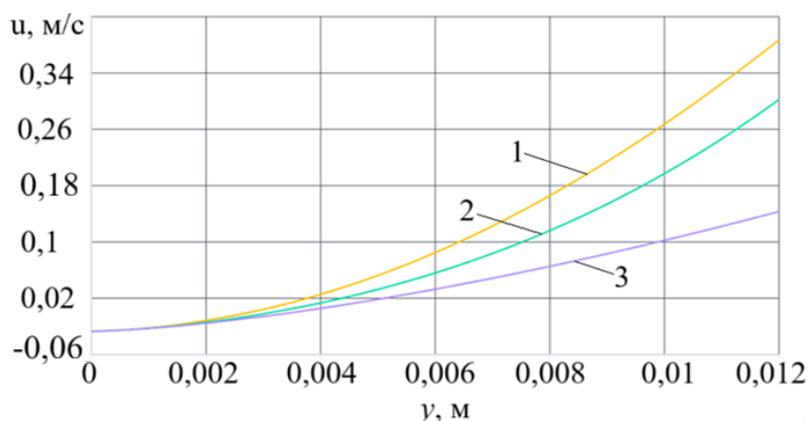


Рисунок 2.5 – Залежності швидкості руху СЗМ за його глибиною шару:

$$1 - K_v=1 \times 10^{-5}, 2 - K_v=1 \times 10^{-3}; 3 - K_v=1$$

$$(\rho_p = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \mu = 0,015 \text{ Пас}; f_0=0,47; h=0,012\text{м}; C_0=0,4)$$

Характер зміни залежностей (рис.2.5) доводить, що при наближенні до поверхні ППП відбувається істотний вплив на динамічні показники руху СЗМ внаслідок розміщення ОЕ. Розробка методики та ідентифікація значень коефіцієнта структурності дозволить інтенсифікувати процеси сепарування та адекватно моделювати/розраховувати сепарувальне обладнання.

Для визначення швидкості руху дослідних СЗМ приймаємо значення коефіцієнта структурності відповідно до кінематичних параметрів ППП (амплітуди та частоти коливань) (рис.2.3, 2.4): для СЗМ кукурудзи приймаємо $K_v=0,12$; для СЗМ соняшнику приймаємо $K_v=0,043$. Чисельні розрахунки за (2.28) дозволили отримати графічні залежності (рис.2.6).

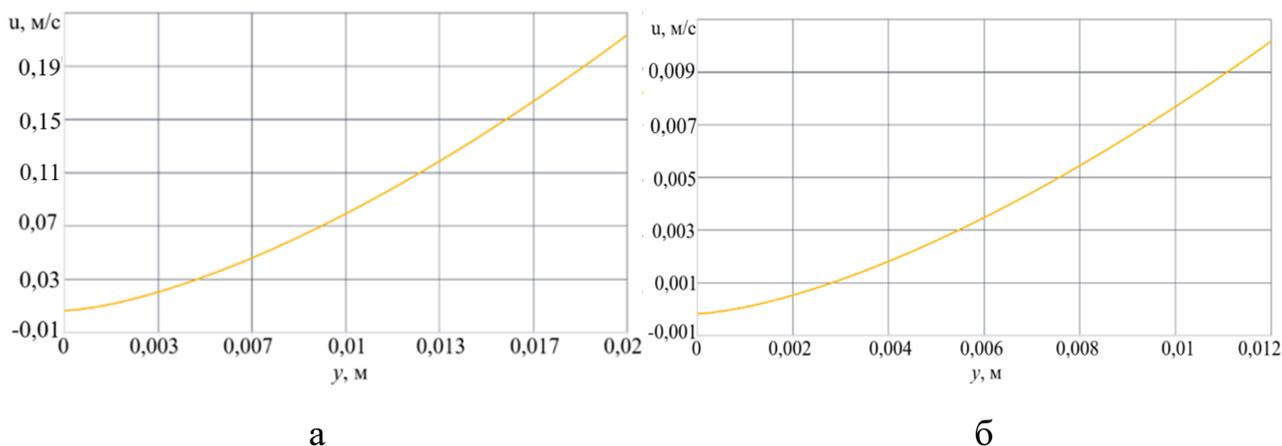


Рисунок 2.6 – Закономірності зміни швидкості СЗМ кукурудзи (а) і соняшнику (б) за товщиною шару

Нелінійна швидкість руху СЗМ також підтверджує вплив ОЕ на динаміку середовища. Зміна швидкості підшарів СЗМ відбувається в діапазоні до 0,021 м/с (для СЗМ кукурудзи) та до 0,09 м/с (для СЗМ соняшнику).

Розрахунки продуктивності ППП виконані за (2.39) для СЗМ кукурудзи та соняшнику (рис.2.7).

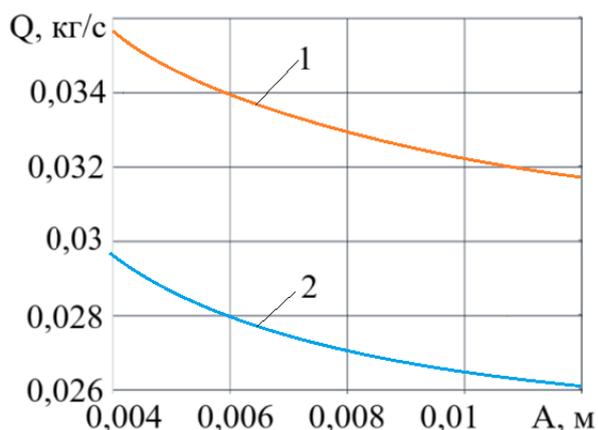


Рисунок 2.7 – Залежність продуктивності ППП від амплітуди коливань:

- 1 –СЗМ кукурудзи ($K_v=0,12$; $\omega=41,86$ рад/с);
- 2 –СЗМ соняшнику ($K_v=0,043$; $\omega=41,86$ рад/с)

Інтенсивність режиму коливань (рис.2.7) негативно впливає на продуктивність ППП, незалежно від властивостей СЗМ, аналогічно зі швидкістю руху СЗМ (рис.2.4).

Для можливості використання на інших СЗМ та конструкціях СЗМ наведено узагальнений графік продуктивності ППП від коефіцієнта структурності (рис.2.8), що комплексно ураховує конструктивні особливості ППП та властивості СЗМ.

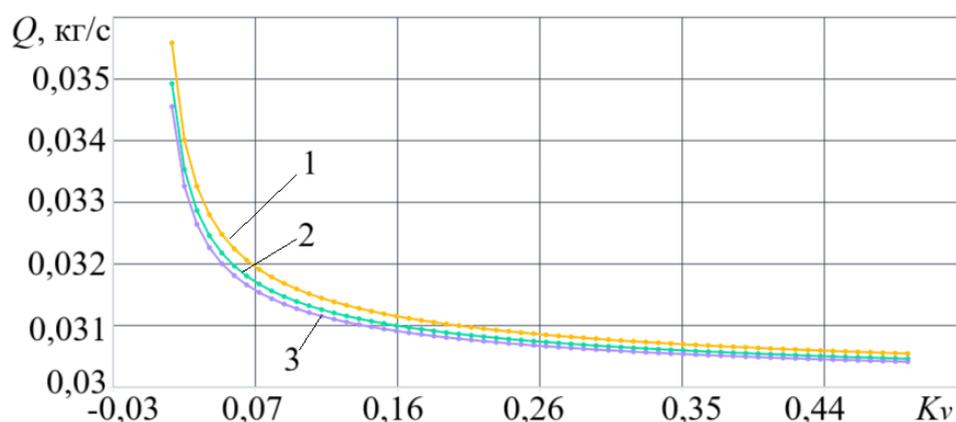


Рисунок 2.8 – Залежності продуктивності ППП від коефіцієнту структурності:

1 – $A=0,004m$; 2 – $A=0,008m$; 3 – $A=0,012m$ ($L=1m$; $B = 1m$; $\omega=41,86$ рад/с;
 $\alpha=8$ градусів; $\mu = 0,015$ Пас; $\rho_p = 1200 \frac{кг}{м^3}$; $f_0=0,4$; $h=0,02m$; $C_0=0,28$)

Отримані залежності (рис.2.8) доводять можливість моделювання продуктивності ППП при різних їх конструктивах, через врахування узагальнюючого коефіцієнту структурності.

2.1.3. Модель динаміки зернових матеріалів на циліндричній просіювальній поверхні об'ємної структури.

Значущість впливу параметрів ППП на ефективність процесу сепарування не викликає сумнівів. Проте дія на компоненти СЗМ при їх русі на плоских ППП, суттєво відрізняється від використання конічних та циліндричних форм ППП [8,

14, 139]. Недостатні технологічні показники сепарувального обладнання потребували пошуку нових технічних рішень та аналітичних підходів в різних галузях [140-142].

Застосування циліндричних ППП на вертикальних віброцентрових сепараторах є одним із способів інтенсифікації процесу сепарації СЗМ [4, 8, 143]. Так, питома продуктивність циліндричних ППП на подібному обладнанні становить 8...12 т/м²·год, що в 3-5 разів перевищує продуктивність плоских ППП [14, 20]. Це можна пояснити додатковим інтенсивним впливом комплексу сил на частинку ЛМ: гравітації, тертя, відцентрових сил. Недостатнє використання сепараційного потенціалу на циліндричних ППП пов'язане труднощами моделювання процесу динаміки СМЗ, внаслідок: інтенсивною кінематикою робочого органу, (кількості сил), мінливими властивостями СЗМ, труднощами врахування додаткових ОЕ на ППП [98, 144].

Ефективність використання ОЕ у вигляді зварних дротів, штампованих рифлів і виїмок на вібраційних ППП доведена в ряді досліджень (рис. 2.9 а) [14, 102, 145].

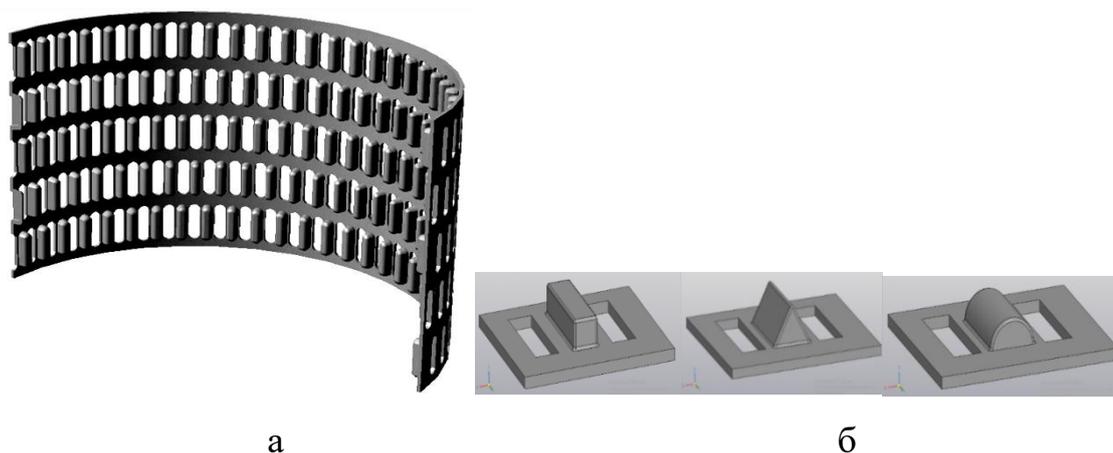


Рисунок 2.9 – Перфоровані просіювальні поверхні (а) з ОЕ різної форми (б)

Такі елементи впливають на СЗМ і розпушують його. Крім того, при взаємодії з ОЕ компоненти СЗМ обертаються навколо своєї поздовжньої осі, що ще більше збільшує їх рухливість і кількість спроб пройти через отвори різними

сторонами. Це інтенсифікує просіювання і підвищує продуктивність сепараційного обладнання. Однак ОЕ, наведені в дослідженнях, мають конкретизовану геометричну форму (розміри поперечного перерізу), що за відсутності аналітичної бази, утруднює інтерпретацію на інші конструктиви та аналіз їхньої ефективності (рис.2.9 б).

Динаміка компоненту СЗМ, яка здійснює складний рух по циліндричній ППС, визначається величиною переміщення, швидкості та прискорення. Базуючись на вібраційному розрідженні шару СЗМ дослідники [9, 14, 143, 146] успішно використовували рівняння руху в'язкої рідини для визначення параметрів руху СЗМ. Моделі в'язких рідин дозволяють системно досліджувати сегрегацію і просіювання компонентів через отвори ППП. Істотною перевагою використання цієї аналогії є врахування взаємодії дисперсних частинок між собою, порівняно з моделюванням завдань динаміки матеріальних точок.

У режимі завантаження циліндричної ППП висота шару СЗМ не повинна перевищувати кілька еквівалентних діаметрів компонентів. Такий режим є типовим, наприклад, для калібрування насінневого матеріалу сільськогосподарських культур [139]. Тоді моделювання процесу сепарації таких компонентів СЗМ може проводитися на основі моделі псевдозрідженого сипучого середовища, яке має в'язкість. У разі руху товстого кільцевого шару СЗМ на циліндричній ППП слід враховувати мінливість коефіцієнта динамічної в'язкості по товщині шару викликану зміною пористості.

Зазначимо, що гідродинамічна модель руху СЗМ з постійним коефіцієнтом в'язкості розроблена в [14, 143]. На відміну від цих робіт пропонується інше формулювання і рішення крайової задачі, в якій враховується вплив отворів і ОЕ циліндричного ППП на процес руху СЗМ.

З точки зору теорії коливань і надійності, конструкція циліндричної ППП представляє собою тонку оболонку круглого перетину [147, 148]. З огляду на технологію виготовлення та складання, циліндрична ППП складається з двох половинок, з'єднаних між собою та обертальних навколо вертикальної осі.

Циліндричні ППП мають отвори, які розташовані з кроком по колу циліндра і вздовж його серцевини. Для досліджень було обрано ППП, на внутрішній поверхні якого між отворами були розташовані штаповані ОЕ.

З урахуванням конструктивних і кінематичних особливостей ППП для досліджень коливань розглядаються наступні сили: відцентрові сили, що виникають при обертанні циліндричного ППП навколо своєї осі; сили інерції, що виникають при лінійних прискореннях внаслідок руху ППП вздовж своєї осі (поступальний рух барабана); сила впливу очисників; вплив маси СЗМ на корпус під час його поступального та обертального руху.

Використання ОЕ на циліндричних ППП (рис.2.9) призводить до складного впливу на компоненти СЗМ. З одного боку, компоненти СЗМ орієнтуються у напрямку отворів, піднімаючись на бокових поверхнях елементів. Водночас обертання компонентів призводить до імпульсів в шарі матеріалу, що збільшує кількість пор, рухливість і позитивно впливає на їх просіювання [145].

Однак розташування ОЕ на робочій вібраційній ППП створює додатковий опір руху компонентів СЗМ. Слід зазначити, що на величину опору руху будуть впливати: параметри ОЕ, кінематичні параметри вібраційного ППП, властивості вихідного СЗМ, що вимагає окремого вивчення і відповідних досліджень.

ОЕ (рис.2.10) мають об'ємну поздовжню (відносно осі руху матеріалу) конструкцію. Вони розташовані на місці частини отворів і зміщені в ряди.

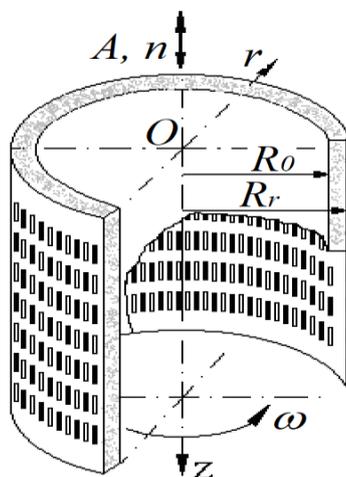


Рисунок 2.10 – Схема циліндричної ППП з ОЕ

ОЕ обертають компонент СЗМ навколо її поздовжньої осі і орієнтують її в отвір відповідно до параметра сепарації – товщини. Шахове розташування ОЕ забезпечує багаторазовий вплив (орієнтацію) на частинки СЗМ.

Моделювання руху СЗМ вздовж внутрішньої робочої поверхні вертикальної циліндричної ППП з використанням гідродинамічної аналогії вимагає розгляду однорідної рідини з певною в'язкістю [14, 149]. Коефіцієнт вібраційної в'язкості псевдозрідженого середовища під дією вібрації залежить від відцентрової сили. Для дослідження величини коефіцієнта вібров'язкості необхідно враховувати відстань координати r (рис. 2.10) шару від осі обертання циліндричної ППП. Відмінність від відомих досліджень полягає в необхідності враховувати ступінь впливу параметрів отворів і ОЕ на динаміку компонентів СЗМ на робочій ППП.

СЗМ рухається вздовж внутрішньої ППП з радіусом R_R по кільцевому шару товщиною h (рис. 2.10). Швидкість СЗМ $U(r)$ спрямована вздовж осі z і залежить від радіальної координати r . Верхня межа шару середовища розташована на відстані $R_0=R_R-h$. Циліндрична ППП обертається навколо осі z з кутовою швидкістю ω і виконує вертикальні коливання вздовж неї з амплітудою A і частотою n (рис.2.10).

Припускаючи постійний коефіцієнт динамічної в'язкості, швидкість подібного середовища є розв'язанням рівняння [150]:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} = N, \quad (2.40)$$

в якому

$$N = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g \right), \quad (2.41)$$

де $\Delta P/l$ – зміна тиску відносно висоти шару середовища, що рухається вздовж ППП; ρ – щільність шару СЗМ.

Коефіцієнт динамічної в'язкості середовища визначається за виразом [151]:

$$\mu = \frac{F_T}{6nd \sqrt{(A)^2 - \left(\frac{\pi F_T}{2m\gamma n^2} \right)^2}}, \quad (2.42)$$

де $F_T = \frac{f\pi^2 d^2 p \xi}{4}$ – сила тертя, що діє на частинку при коливаннях середовища; d, m – середні значення діаметра і маси одного компонента СЗМ; γ – коефіцієнт прилипання маси до рухомого компоненту СЗМ; $p = \frac{\rho\omega^2}{2} \left(\left(R_R - \frac{h}{2} \right)^2 - R_0^2 \right)$ – внутрішній тиск СЗМ з [14]; f – коефіцієнт поправки, що враховує пористість середовища.

Визначимо граничні умови, що характеризують хід процесу і дозволяють вирішити рівняння (2.41).

На внутрішній поверхні рухомого шару СЗМ немає тангенціальних напружень тому приймемо:

$$\frac{dU}{dr} = 0. \quad (2.43)$$

На ППП $r = R_R$ існує сила взаємодії між СЗМ і ППП – сила сухого тертя, яка вважається незалежною від швидкості $U(R_R)$. Вона відповідає середньому тангенціальному напруженню:

$$\tau_1 = f_0 p_1 (1 - \varepsilon), \quad (2.44)$$

де $p_1 = \rho h R_R \omega^2$ – тиск у середовищі на циліндричному ППП; f_0 – динамічний коефіцієнт тертя компонентів СЗМ на циліндричному ППП; ε – коефіцієнт вільної площі ППП:

$$\varepsilon = \frac{\sum S_0}{S} 100\% = \frac{N_0 S_0}{2\pi R_R L} \cdot 100\%, \quad (2.45)$$

де S_0 – площа одного отвору ППП; S – загальна площа поверхні ППП; N_0 – кількість отворів у ППП; L – довжина ППП (висота циліндра).

Враховуючи перетворення, маємо:

$$\tau_1 = f_0 \rho h R_R \omega^2 \left(1 - \frac{N_0 S_0}{2\pi R_R L} \right) = \frac{f_0 \rho h \omega^2}{2\pi L} (2\pi R_R L - N_0 S_0). \quad (2.46)$$

На ППП також відбувається взаємодія рухомого шару середовища з ОЕ та отворами між ними.

Сила дії одного ОЕ береться пропорційно площі його поперечного перерізу, тиску p_1 і першому ступеню швидкості фракції, тобто у вигляді:

$$F_r = K_V S_r p_1 U(r), \quad (2.47)$$

де S_r – площа поперечного перерізу ОЕ; K_V – коефіцієнт структурності, що враховує взаємодію між ОЕ і СЗМ.

Для розрахунків приймаємо кілька варіантів ОЕ (рис.2.11): з прямокутним перерізом: $S_{r_r} = h_r b_r$, де h_r, b_r – висота і ширина ОЕ; з трикутним перерізом:

$$S_{rt} = \frac{1}{2} b_r h_r; \text{ з напівкруглим перерізом: } S_{rs} = \frac{\pi b_r^2}{8}, \text{ де } h_r = b_r/2.$$

Сила (2.47) відповідає середньому тангенціальному напруженню:

$$\tau_2 = \frac{F_r}{S} = \frac{K_V S_r N_r p_1}{S} U(r) = \frac{K_V S_r \rho h \omega^2 N_r}{2\pi L} U(r), \quad (2.48)$$

де N_r – кількість ОЕ на ППП; S_r – площа поперечного перерізу ОЕ.

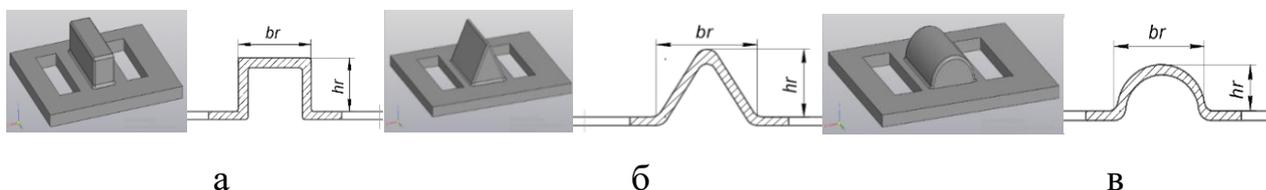


Рисунок 2.11 – Варіанти ОЕ: а – прямокутний; б – трикутний; в – напівкруглий

Сформуємо другу граничну умову на $r = R_R$:

$$-\mu \frac{dU}{dr} = \tau_1 + \tau_2. \quad (2.49)$$

Наголосимо, що в (2.49) $\tau_2 > 0$. При $\tau_2 = 0$ наведена постановка крайової задачі втрачає коректність.

Загальне рішення (2.40) є сумою:

$$U(r) = \frac{1}{4} N r^2 + c_1 \ln r + c_2, \quad (2.50)$$

де c_1 і c_2 – сталі інтегрування, що визначаються з крайових умов (2.43), (2.49).

Перша умова виконується при:

$$c_1 = -\frac{1}{2} N R_0^2. \quad (2.51)$$

Друга гранична умова виконується, коли:

$$c_2 = -\frac{\mu N \pi L}{K S_r \rho R_R \omega^2 N_r} R_0 - \frac{N R_R^2}{4} - c_1 \ln R_R - \frac{f_0 (2\pi R_R L - N_0 S_0)}{K S_r N_r}. \quad (2.52)$$

З урахуванням розв'язку (2.50) і значень сталих (2.51), (2.52) отримуємо вираз для швидкості руху СЗМ по циліндричній ППП:

$$U(r) = \frac{1}{4}Nr^2 - \frac{NR_0^2}{2} \ln r - \frac{\mu N \pi L (R_R - h)}{K S_r \rho R_R \omega^2 N_r} - \frac{1}{4}NR_R^2 + \frac{NR_0^2}{2} \ln R_R - \frac{f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0)}{K S_r N_r}.$$

Або, перетворивши, отримаємо:

$$U(r) = \frac{N}{2} \left[\frac{r^2 - R_R^2}{2} + R_0^2 \ln \frac{R_R}{r} - \frac{2\mu \pi L R_0}{K S_r \rho R_R \omega^2 N_r} - \frac{2f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0)}{N K S_r N_r} \right]. \quad (2.53)$$

Об'ємна витрата СЗМ (продуктивність ППП) визначається інтегруванням:

$$Q = 2\pi \int_{R_0}^{R_R} r U(r) dr. \quad (2.54)$$

Обчислення інтеграла з урахуванням $R_0 = R_R - h$ приводить до формули:

$$Q = \frac{\pi N}{2} \left\{ (R_0 h + h^2) \left[\frac{3R_0^2 - R_R^2}{4} - \frac{2\mu \pi L R_0}{K_V S_r \rho R_R \omega^2 N_r} - \frac{2f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0)}{N K_V S_r N_r} \right] + R_0^4 \ln \frac{R_0}{R_R} \right\}. \quad (2.55)$$

Оскільки в розглянутій задачі $h \ll R_R$, знехтувавши малими доданками, замість (2.55) отримаємо спрощений наближений аналітичний вираз для продуктивності циліндричної ППП:

$$Q \approx -2\pi R_R h N \left[\frac{h^2}{3} + \frac{2\pi L \mu}{K_V S_r \rho \omega^2 N_r} + \frac{f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0)}{N K_V S_r} \right]. \quad (2.56)$$

Продуктивність ППП також визначається за виразом:

$$Q = u_{cp} S_k = u_{cp} 2\pi R_R h, \quad (2.57)$$

де S_k – кільцевий переріз шару СЗМ, що рухається всередині ППП.

Тоді середня швидкість руху сходової фракції:

$$U_{cp} = \frac{Q}{2\pi R_R h} = -N \left[\frac{h^2}{3} + \frac{2\pi L \mu}{K_V S_r \rho \omega^2 N_r} + \frac{f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0)}{N K_V S_r} \right]. \quad (2.58)$$

У випадку, коли перетворимо $\Delta p = 0$ convert (2.41) і отримаємо $N = -\frac{\rho g}{\mu}$.

Тоді залежність (2.56) набуває вигляду скінченного аналітичного виразу для продуктивності циліндричної ППП:

$$\begin{aligned} Q &= -2\pi R_R h \left(-\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{h^2}{3} + \frac{2\pi L \mu}{K_V S_r \rho \omega^2 N_r} - \left(\frac{f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0) \mu}{\rho g K_V S_r} \right) \right] = \\ &= 2\pi R_R h \left[\frac{h^2 \rho g}{3\mu} + \frac{1}{K_V S_r} \left(\frac{2\pi L g}{\omega^2 N_r} - f_0(2\pi R_R L - N_0 S_0) \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.59)$$

Залежність (2.58) також перетворюється на скінченний аналітичний вираз для середньої швидкості руху СЗМ по циліндричній ППП:

$$\begin{aligned}
 U_{cp} &= - \left(-\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{h^2}{3} + \frac{2\pi L \mu}{K_V S_r \rho \omega^2 N_r} - \left(\frac{f_0 (2\pi R_R L - N_0 S_0) \mu}{\rho g K_V S_r} \right) \right] = \\
 &= \frac{h^2 \rho g}{3\mu} + \frac{1}{K_V S_r} \left(\frac{2\pi L g}{\omega^2 N_r} - f_0 (2\pi R_R L - N_0 S_0) \right). \quad (2.60)
 \end{aligned}$$

Таким чином, рівняння (2.60), (2.61) і (2.42) є остаточними аналітичними виразами для визначення параметрів динаміки СЗМ та продуктивності циліндричної ППП з урахуванням варіювання параметрів ОЕ.

Чисельні прорахунки отриманих математичних виразів виконано опираючись на данні попередніх досліджень [139, 153], властивостей СЗМ кукурудзи та соняшнику, що дозволило прийняти наступні параметри ОЕ (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Інтеграція параметрів ОЕ до типу СЗМ

Параметри	Позначення	Тип СЗМ				
		кукурудза			соняшник	
Висота ОЕ, 10^{-3} м	h_r	1	3	5	1	2
Площа поперечного перерізу ОЕ з прямокутним профілем, 10^{-4} м ²	S_{rr}	0.04	0.12	0.2	0.03	0.06
Площа поперечного перерізу ОЕ з трикутним профілем, 10^{-4} м ²	S_{rt}	0.02	0.06	0.1	0.015	0.03
Площа поперечного перерізу ОЕ з напівкруглим профілем, 10^{-4} м ²	S_{rs}	0.031	0.094	0.157	0.024	0.047

Унаслідок числового прорахунку отримано графічні залежності коефіцієнта динамічної в'язкості середовища СЗМ (рис.2.12), швидкості руху середовища (рис.2.13, 2.14) та продуктивності ППП (рис.2.15).

За результатами дослідження встановлено (рис.2.12), що коефіцієнт динамічної в'язкості середовища залежить від коефіцієнта тертя та висоти шару середовища на ППП. Діапазон зміни для СЗМ кукурудзи становив 0,12–0,63 Па·с, для СЗМ соняшнику – 0,05–0,13 Па·с. В'язкість середовища є суттєвим і узагальненим параметром, який визначає динаміку середовища та продуктивність ППП.

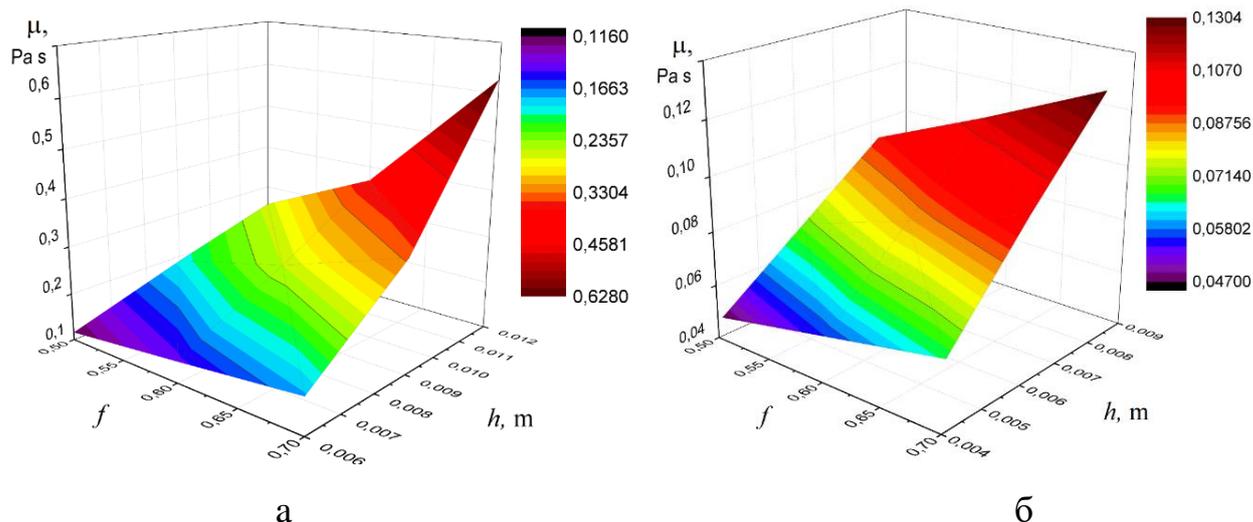


Рисунок 2.12 – Залежності коефіцієнта динамічної в'язкості середовища від коефіцієнта тертя компонентів і висоти шару: а – СЗМ кукурудзи ($A=0,008\text{м}$, $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f_0=0,27$; $S_0=1\times 10^{-4}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,004\text{м}$; $N_p=1736$; $K=40\text{с/м}$; $d=0,006\text{м}$; $\rho=730\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$); б – СЗМ соняшнику ($A=0,008\text{м}$, $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f_0=0,27$; $S_0=4,8\times 10^{-5}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,003\text{м}$; $N_p=4314$; $K_v=40\text{с/м}$; $d=0,004\text{м}$; $\rho=390\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$)

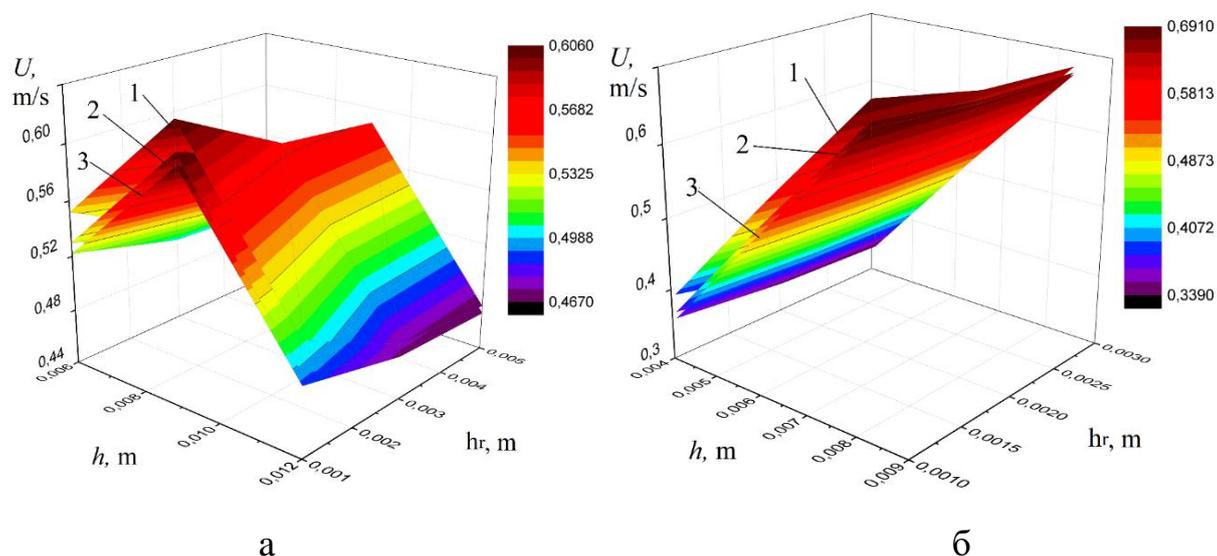


Рисунок 2.13 – Аналітичні залежності швидкості середовища від висоти шару (h) і висоти встановлених ОЕ (h_r) для різних форм їх профілю: 1 – трикутний; 2 – напівкруглий; 3 – прямокутний; а – СЗМ кукурудзи ($A=0,008\text{м}$, $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=1\times 10^{-4}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,004\text{м}$; $N_p=1736$; $K=40\text{с/м}$; $d=0,006\text{м}$; $\rho=730\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$); б – СЗМ соняшнику ($A=0,008\text{м}$, $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=4,8\times 10^{-5}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,003\text{м}$; $N_p=4314$; $K_v=40\text{с/м}$; $d=0,004\text{м}$; $\rho=390\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$)

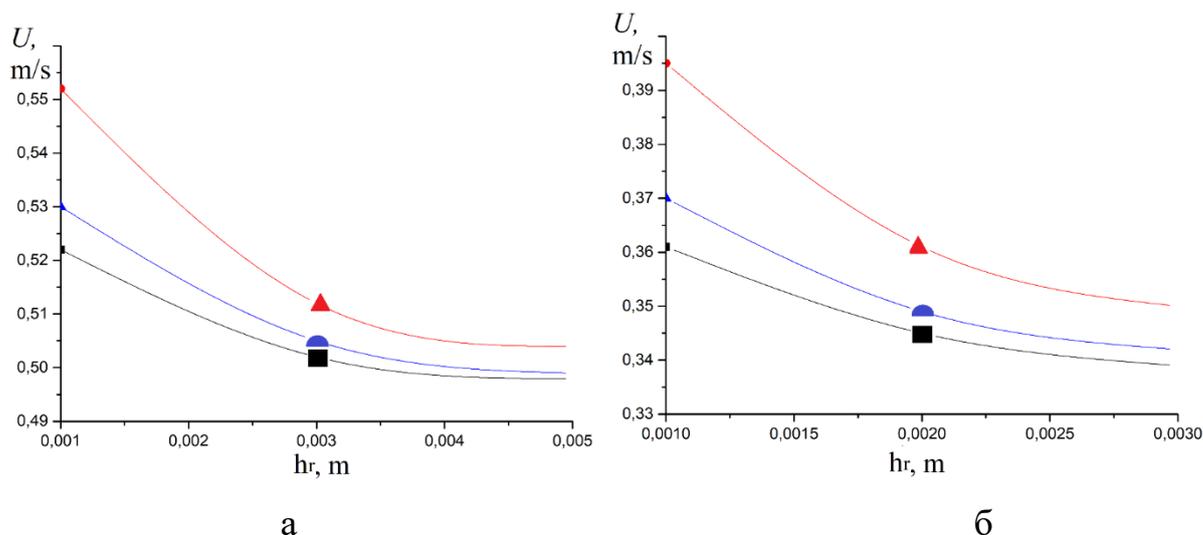


Рисунок 2.14 – Аналітичні залежності швидкості середовища від висоти ОЕ h_r для різних форм їх профілю: $\text{—}\bullet\text{—}$ напівкруглий; $\text{—}\blacktriangle\text{—}$ трикутний; $\text{—}\blacksquare\text{—}$ прямокутний: а – СЗМ кукурудзи ($A=0,008\text{м}$; $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=1\times 10^{-4}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,004\text{м}$; $N_p=1736$; $K=40\text{с/м}$; $d=0,006\text{м}$; $\rho=730\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$; $h=0,006\text{м}$); б – СЗМ соняшнику ($A=0,008\text{м}$; $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=4,8\times 10^{-5}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,003\text{м}$; $N_p=4314$; $K_v=40\text{с/м}$; $d=0,004\text{м}$; $\rho=390\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$; $h=0,004\text{м}$)

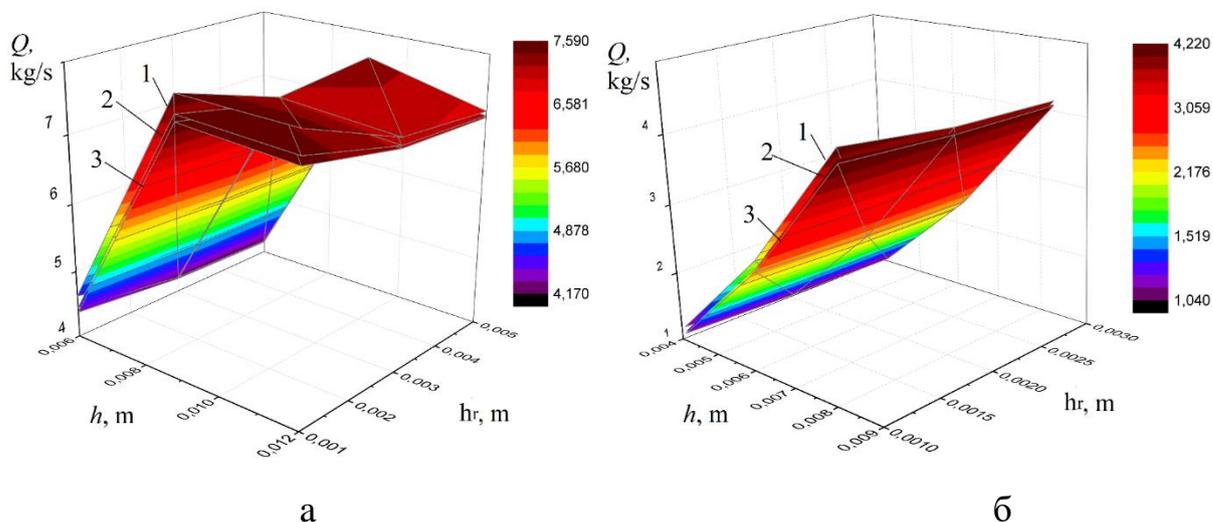


Рисунок 2.15 – Аналітичні залежності продуктивності циліндричної ППП від висоти шару (h) і висоти ОЕ (h_r) для різних видів профілів ОЕ: 1 – трикутний; 2 – напівкруглий; 3 – прямокутний; а – СЗМ кукурудзи ($A=0,008\text{м}$; $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=1\times 10^{-4}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,004\text{м}$; $N_p=1736$; $K_v=40\text{с/м}$; $d=0,006\text{м}$; $\rho=730\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$); б – СЗМ соняшнику ($A=0,008\text{м}$; $n=75,9\text{с}^{-1}$; $f=0,7$; $f_0=0,27$; $S_0=4,8\times 10^{-5}\text{м}^2$; $R=0,3075\text{м}$; $l=0,5\text{м}$; $b_p=0,003\text{м}$; $N_p=4314$; $K=40\text{с/м}$; $d=0,004\text{м}$; $\rho=390\text{кг/м}^3$; $\xi=0,65$)

Отримано варіювання швидкості СЗМ на ППП з урахуванням зміни параметрів ОЕ і висоти шару середовища. Діапазони зміни швидкості СЗМ: для кукурудзи 0,47–0,61 м/с, для соняшнику 0,34–0,69 м/с.

Підвищення висоти ОЕ у дослідженому діапазоні призводить до зменшення швидкості СЗМ кукурудзи на 4,31–8,11% — до 0,5 м/с, а соняшникового — на 5,81–10,2% — до 0,345 м/с (рис. 2.13). Найменший вплив на зниження швидкості чинять ОЕ і з трикутним поперечним перерізом, далі — напівкруглі та прямокутні. Низька швидкість СЗМ з прямокутними ОЕ пояснюється максимальною площею їх поперечного перерізу.

Аналіз залежностей (рис. 2.15) встановив, що збільшення висоти шару середовища в межах дослідженого діапазону підвищує продуктивність на 70,42–71,24%: до 7,92 кг/с при сепарації СЗМ кукурудзи, та на 264,3–291,6% – до 4,41 кг/с при сепарації СЗМ соняшнику. Таке збільшення шару СЗМ є типовим для зміни технологічного режиму калібрування на фракції, попереднього або первинного розділення. Максимальні значення продуктивності ППП отримано для ОЕ трикутного поперечного профілю, незалежно від типу середовища та його висоти шару. Приріст продуктивності на ППП з подібними ОЕ становив 1,2–6% (кукурудза) та 1,65–9,19% (соняшник) порівняно з ОЕ прямокутного та напівкруглого поперечного перерізу. Найбільша різниця значень продуктивності ППП спостерігається за низької висоти ОЕ ($h_r = 1\text{мм}$) – 3.5-6% (кукурудза) 3.4-6.5% (соняшник), найменша $h_r = 3\text{мм}$ – 1-4.5% (кукурудза) і 1.2-3.2% (соняшник).

Таким чином, в результаті аналітичних досліджень опрацьовано:

- на базі гідродинамічної аналогії побудовано математичну модель динаміки СЗМ на циліндричній ППП, яка враховує її конструктивні й кінематичні параметри, зокрема форму та параметри ОЕ, а також властивості СЗМ;

- отримано закономірності зміни коефіцієнта динамічної в'язкості СЗМ під дією вібрації, який є істотним і узагальненим параметром, що комплексно визначає динамічні характеристики під час просіювання компонентів;

- за допомогою визначених аналітичних виразів встановлено залежності швидкості переміщення СЗМ (кукурудза, соняшник) і продуктивності

циліндричної ППП за використання ОЕ прямокутного, трикутного та напівкруглого профілю; встановлено їхні діапазони варіювання.

2.2. Чисельні моделювання надійності перфорованих просіювальних поверхонь

Вібрація інтенсифікує просіювання СЗМ на ППП, проте є негативним фактором для їх надійності. Цей напрямок можна досліджувати аналітично та експериментально [153] або методом скінчених елементів (МСЕ) [109]. Крім того, набирають популярності неруйнівні методи дослідження показників надійності деталей [154, 155].

Під час експлуатації на ППП діє низка зовнішніх навантажень [51, 156]: динамічні навантаження від очищувачів отворів, інерційні навантаження від вібраційних коливань ППП, навантаження від шару СЗМ. Це призводить до змінних прогинів поверхонь, які слугують джерелом додаткових збурень для шару СЗМ і визначають динамічну деформацію ППП.

ППП є механічною системою, яка за своїми експлуатаційними характеристиками може піддаватися резонансу у вигляді співвідношень між власними частотами системи та частотами зовнішніх навантажень. Тому одним із завдань дослідження ефективності ППП стало визначення власних частот і форм, що дозволяють оцінити можливість виникнення резонансних режимів.

За наявності зовнішнього навантаження викликаного наявністю матеріалу або вібрації, виникають напруження в конструкції [157]. З точки зору механіки ППП є пластинами, один розмір якої (товщина) значно менше двох інших (ширини або довжини). Надійність пластини, яка має отвори, характеризується появою концентраторів напружень. Концентратори напружень розміщуються переважно між отворами [158]. Концентрацію напружень в перфорованих пластинах різної товщини та з круглими отворами представлена в [159].

Частіше надійність пластин з отворами вивчають за допомогою методів скінчених елементів [160, 161]. Використання методу скінчених елементів дозволяє

з достатньою точністю визначити власні частоти коливань перфорованих пластин [108, 162, 164], визначити критичні напруження та їх концентратори [109, 161].

Серед праць щодо надійності перфорованих пластин слід відмітити [165], де закладені основні вирази щодо обчислення напружень, мод коливань та інших показників.

Використання методу скінчених елементів експериментальної голографічної інтерферометрії для дослідження переміщень на напружень при згині перфорованої пластини успішно реалізовано в [166].

Використання методу дискретних елементів (DEM) також було використано дослідниками для визначення технологічної ефективності процесу сепарування на зношування перфорованої поверхні [167]. Проте точність даного моделювання DEM залежить від комплексу тривалих попередніх експериментів.

Позитивна практика використання чисельного моделювання надійності перфорованих пластин, обґрунтування граничних та початкових умов, варіювання параметрів перфорації проведено в [168].

Вплив зовнішнього навантаження на показники надійності перфорованих пластин був також успішно досліджено за допомогою МСЕ та експериментів [169, 170].

Для вирішення таких задач, пов'язаних з коливаннями ППП, ефективним є використання FEM [109, 147, 162], що дозволяє досліджувати поведінку компонентів складних механічних систем під дією різних зовнішніх впливів.

ППП моделюється як структура, що складається з значної кількості простих об'єктів (скінчених елементів - СЕ), в межах яких закон зміни шуканих величин (переміщення, напруження) відомий і визначається значеннями параметрів у вузлах сітки. Це дозволяє перейти від системи з нескінченною кількістю ступенів свободи до системи з скінченною їх кількістю. У цьому випадку всі задані навантаження, геометричні та фізичні характеристики, а також початкові деформації зводяться до вузлів. Реалізація методу дозволяє визначати напружено-деформаційний стан в будь-якій точці ППП.

Типовий алгоритм передбачає [109, 147]: побудова функціоналу; розкладання системи на FE і вибір координатних функцій; побудова матриць жорсткості і маси, приведення розподілених навантажень до вузлів для кожного FE; формулювання і розв'язання канонічних рівнянь.

Серед дослідників увага надійності конструкції приділялася переважно отворам стандартної геометрії: круглим [160, 161], прямокутних [171]. Переваги використання круглих отворів по відношенню до форм з кутами за показником коефіцієнт концентрації напруження доведено в [171].

Значущим фактором надійності пластин з отворами є їх товщина [109]. В роботі [172] авторами запропоновано розгляд отворів у пластині як ідеально тонку її частину. Отримана перфорована пластина має неоднорідну товщину та за певних умов моделювання може давати точні числові розв'язки щодо показників надійності.

У разі використання ППП додатковим негативним фактором є наявність шару СЗМ. Це матеріал утворює зовнішнє розподілене навантаження, величина якого залежить від щільності середовища та товщини його шару на ППП. Утворене навантаження збільшує внутрішні напруження, які викликають деформації.

Крім того негативним фактором є зміна товщини ППП внаслідок механічного абразивного зношення [173 - 175]. Зміна товщини пластини в процесі експлуатації також призводить до зменшення жорсткості конструкції (D), яка прямопропорційно трикратно залежить від товщини, модулю Юнга, коефіцієнта Пуассона.

Поставленим завданням стало розробка методики ідентифікації довговічності ППП з об'ємною структурою на базі експериментально даних та численних КЕ-моделей, які дозволяють врахувати параметри отворів/ОЕ, навантаження від СЗМ.

Дослідження напруження в ППП об'ємної структури.

Попереднім аналізом встановлені значущі фактори, які впливають на показники надійності ППП: товщина пластин, конструктивні параметри отворів та перемичок, параметри ОЕ та їх локалізація, зовнішнє навантаження СЗМ.

Критичні напруження та частота власних в конструкціях перфорованих пластин визначається інтенсивністю зносу за товщиною, зовнішнім навантаженням та конструктивними параметрами. Для чисельних досліджень обрано наступні ППП

(рис.2.16). Крім того, з урахуванням практичної економії виробництва ППП, а також даних відомих досліджень [108, 177] для досліджень обрано наступні параметри та властивості матеріалу перфорованих пластин (табл.2.2).

Так, вибраний діапазон товщини пластини ґрунтується на зменшенні в процесі експлуатації товщини від початкової (1.0 мм) на 40%, що складає 0.6 мм.

Для перевірки достовірності результатів та розширення їх практичного застосування для дослідження обрано два різних за властивостями типи СЗМ (табл.2.3): кукурудза та соняшник.

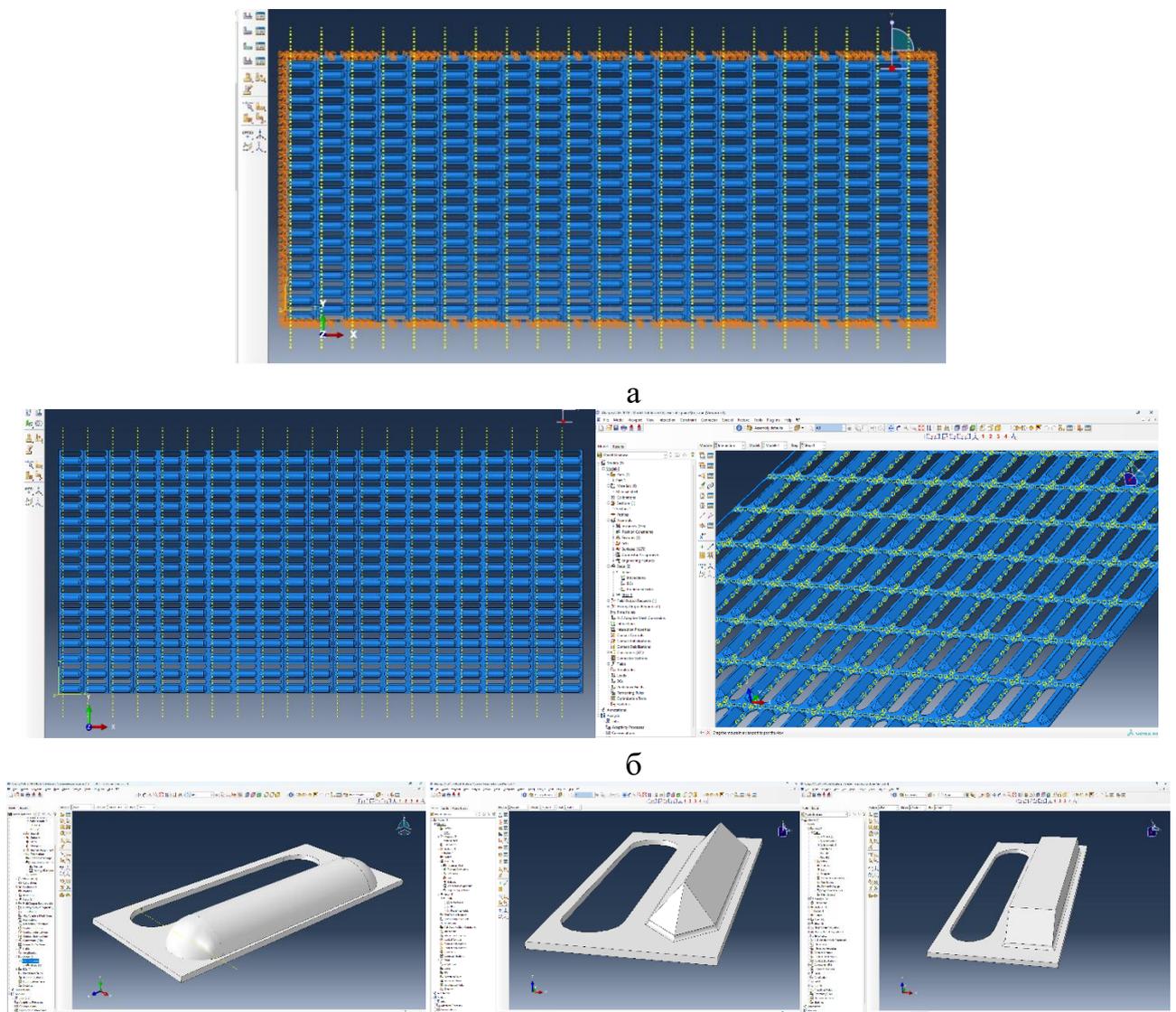


Рисунок 2.16 – Дослідні ППП об’ємної структури: а – з шаховим розташуванням ОЕ; б – з рядним розташуванням ОЕ; в – ОЕ з профілем напівкола; г – ОЕ з профілем трикутним; д – ОЕ з профілем прямокутним

Таблиця 2.2 – Вихідні данні дослідних перфорованих пластин

Параметри/ властивості	Значення
Матеріал	Сталь оцинкована Б-ПН-О-в ГОСТ 19904-90/ ОН-КР-2 ГОСТ 14918-80
Товщина, мм	0.6-1.0
Габаритні розміри, мм	770x250
Розміри отвору, мм	5x20
Модуль Юнга, ГПа	207
Щільність, кг/м ³	7800
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Границя пластичності, МПа	230
Границя міцності, МПа	400

Таблиця 2.3 – Властивості СЗМ для чисельного моделювання

Тип СЗМ	Зовнішнє навантаження, Па
кукурудза	250
соняшник	192

Чисельне моделювання перфорованих пластин проведено за алгоритмом (див. розділ 3): створення геометрії (модуль Part), прийняття властивостей матеріалу (модуль Property), кроки розрахунку (модуль Step), взаємодія між елементами (модуль Interaction), створення зовнішнього навантаження та прийняття початкових/граничних умов (модуль Load), побудова кінцево-елементної сітки (модуль Mesh), створення файлу даних та запуск процесу моделювання (модуль Job), візуалізація та обробка кінцевих даних (модуль Vizualization).

Змінними факторами для досліджень стали: тип розташування ОЕ (шахове або рядне), тип профілю ОЕ (трикутний, напівколо, прямокутний), тип СЗМ, товщина пластини. Для цього було побудовано 36 моделей та проведено аналіз показників напружень та частот власних коливань (фрагменти див. Додаток Б).

В результаті чисельного моделювання отримані напруження в дослідних конструкціях перфорованих пластинах за різних умов. Вдалося ідентифікувати зони з найбільшими напруженнями: периферійна (А) та центральна (В) (рис.2.17).

Незалежно від типу СЗМ, типу та розташування ОЕ, товщини перфорованої пластини ці зони чітко прослідковувалися. Тому подальший аналіз був

зосереджений на максимальних напруженнях саме в цих зонах ймовірної деформації.

Максимальні напруження в запропонованих конструкціях перфорованих пластин для двох критичних зон (табл.2.4, 2.5). Аналіз залежностей (табл.2.4, 2.5) доводить про вплив профілю ОЕ, товщини ПППІ та характеру її навантаження на значення внутрішніх напружень. Порівняння профілів ОЕ показує, що профіль в формі напівкола формує найнижчі граничні напруження, тоді як загострений трикутний профіль підвищує їх 27,8-31%, а прямокутний – на 14,2-15,1% в обох контрольних зонах. Такий розподіл узгоджується з класичною теорією: зменшення радіуса в корені ОЕ та збільшення кута схилів приводить до зростання коефіцієнта концентрації напружень.

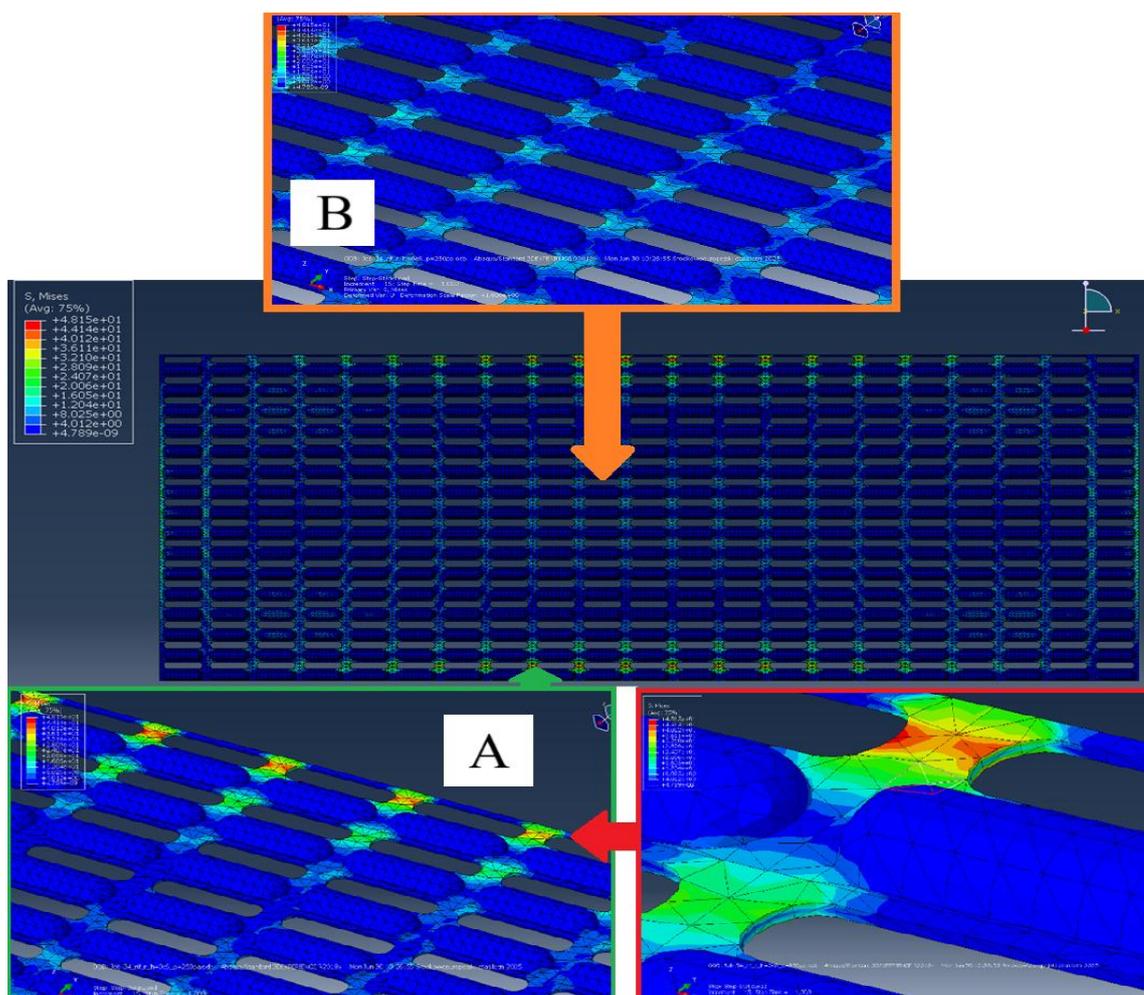


Рисунок 2.16 – Зони з максимальними напруженнями в перфорованій пластині (товщина 0,6мм, СЗМ кукурудза, тип ОЕ- напівколо, розташування ОЕ – рядне)

Таблиця 2.4 – Напруження в перфорованій пластині (шахове розташування ОЕ)

Модель	Тип профілю ОЕ	СЗМ	Товщина пластини, мм	Максимальні напруження зона А, МПа	Максимальні напруження зона В, МПа
1	трикутний	соняшник	0.6	53,8	17,8
2			0.8	38,9	13,1
3			1	28,1	9,4
4	напівколо		0.6	41,4	13,7
5			0.8	30	10
6			1	21,6	7,2
7	прямокутний		0.6	47,6	15,8
8			0.8	34,5	11,6
9			1	24,7	8,3
10	трикутний	кукурудза	0.6	68,9	22,9
11			0.8	50,5	16,8
12			1	36,7	12,2
13	напівколо		0.6	53	17,6
14			0.8	38,9	12,9
15			1	28,2	9,4
16	прямокутний		0.6	61	20,2
17			0.8	44,7	14,8
18			1	32,4	10,8

Таблиця 2.5 – Напруження в перфорованій пластині (рядне розташування ОЕ)

Модель	Тип профілю ОЕ	Тип СЗМ	Товщина пластини, мм	Максимальні напруження зона А, МПа	Максимальні напруження зона В, МПа
1	трикутний	соняшник	0.6	48,8	16,2
2			0.8	33,5	11,1
3			1	24,1	8,1
4	напівколо		0.6	37,5	12,5
5			0.8	25,8	8,6
6			1	18,6	6,2
7	прямокутний		0.6	43	14,4
8			0.8	29,8	9,8
9			1	21,4	7,1
10	трикутний	кукурудза	0.6	62,7	20,8
11			0.8	43,7	14,5
12			1	31,1	10,4
13	напівколо		0.6	48,2	16,1
14			0.8	33,6	11,2
15			1	24	8
16	прямокутний		0.6	55,2	18,6
17			0.8	38,5	12,8
18			1	27,7	9,1

Для аналізу рівня впливу приймемо дані концентрації напружень ППП з профілем ОЕ у формі напівкола за базові. Тоді, вплив типу профілю на концентрацію напружень в ППП можна оцінити через відповідний коефіцієнт:

$$K_{p\sigma} = \frac{\sigma_{A,B}^{\text{профіль}}(h,p)}{\sigma_{A,B}^{\text{напівколо}}(h,p)}. \quad (2.61)$$

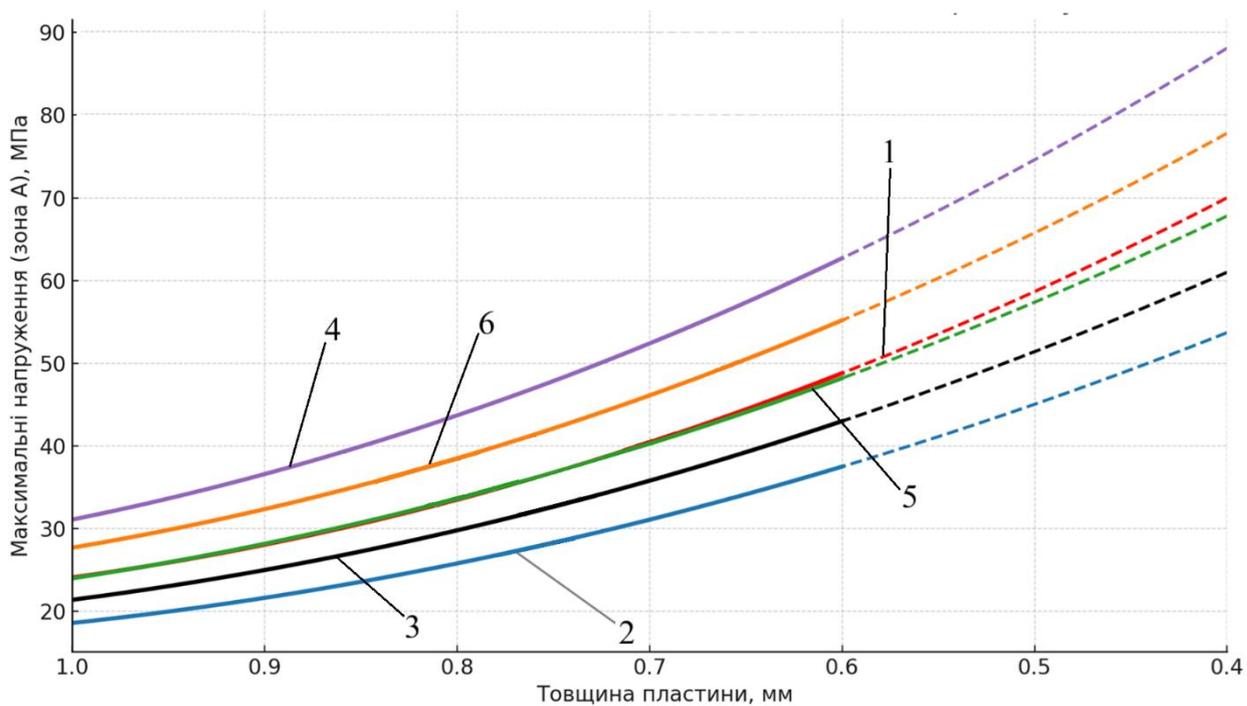
Проаналізувавши дані табл.2.4, 2.5 отримані наступні значення коефіцієнту: для ОЕ з трикутним профілем $K_{p\sigma}=1,24-1.31$; для ОЕ з прямокутним профілем 1,13-1,19.

Для зручності аналізу величини впливу типу ОЕ та зменшення товщини ППП на показники напружень побудована графічна залежність (рис.2.18). Крім цього, додатково було додано прогнозування подальшого зношування (до товщини пластини 0,4 мм) для оцінювання зміни напружень в ППП.

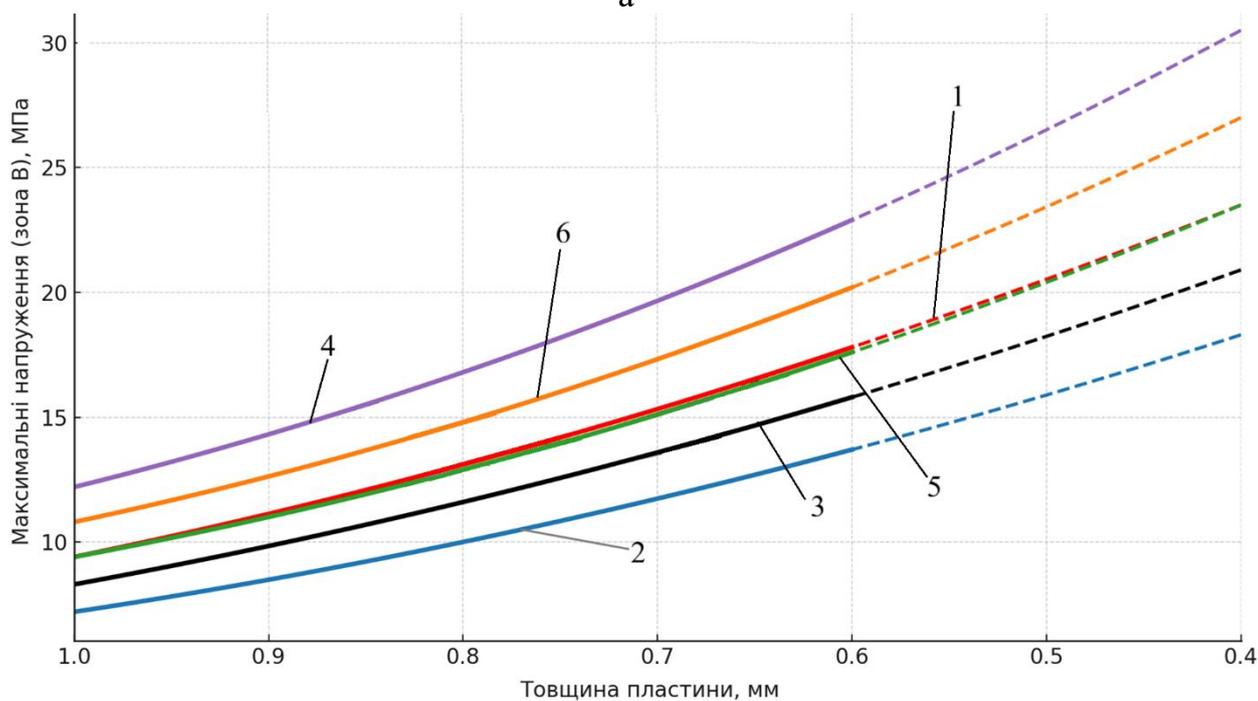
Аналізом залежностей (рис.2.18, Додаток Б) встановлено однотипове зростання напружень зі зменшенням товщини ППП.

Зношення ППП від базової товщини (1 мм) до прогнозованої (0,4 мм) зменшує жорсткість конструкції та призводить до збільшення напружень в 2,6–3,1 рази залежно від профілю ОЕ та режиму навантаження. Вплив типу профілю ОЕ на поле напружень визначає градацію: трикутний > прямокутний > напівколо за величиною напружень. Подібна залежність зберігається в усьому діапазоні товщин, для обох режимів навантаження (соняшник/кукурудза), що узгоджується з класичною теорією напружень. Зміна режиму навантаженні від СЗМ соняшнику/кукурудзи доводить про відмінність на 26,7–31 %, зі збереженням характеру зміни від товщини ППП.

Для зниження пікових напружень в ППП з одночасним збереженням «живого» (проникненість ППП) перетину доцільно застосовувати напівциліндричний (напівколо) профіль ОЕ.



а



б

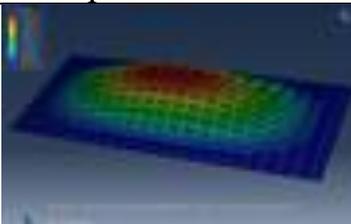
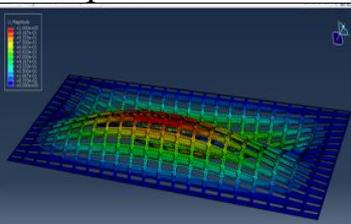
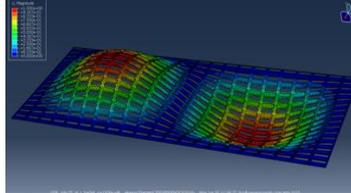
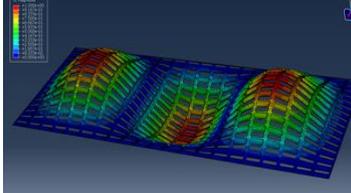
Рисунок 2.18 – Залежність напружень ППП від її товщини та шахового розташування ОЕ з наступними типами профілю: а – периферійна зона А; б – центральна зона В; 1 – трикутний (СЗМ соняшнику); 2 – напівколо (СЗМ соняшнику); 3 – прямокутний (СЗМ соняшнику); 4 – трикутний (ЗСМ кукурудзи); 5 – напівколо (СЗМ кукурудзи); 6 – прямокутний (СЗМ кукурудзи); ----- фактичні данні; - - - - прогнозовані

Дослідження частоти власних коливань ППП об'ємної структури.

Наступним елементом чисельного моделювання стало визначення частоти власних коливань ППП об'ємної структури та перевірка виключення резонансних явищ. Для моделювання використані передні МСЕ моделі.

В результаті МСЕ-моделювання отримані частоти власних коливань дослідних ППП з різними типами ОЕ та їх розташуванням. Для аналізу обрані 4 моди коливань з найменшою частотою, яка може (ймовірно) спричинити резонанс конструкції (табл.2.6, Додаток Б).

Таблиця 2.6 – Візуальне представлення мод коливань дослідних ППП

Мода	Візуальне представлення	Мода	Візуальна представлення
1		3	
2		4	

Візуалізація частот власних коливань дослідних ППП представлена в Додатку Б.

Для опису впливу товщини пластини h та тиску p на граничні напруження і власні частоти ППП використано степеневі моделі у логарифмічній формі $\ln y = A + B \ln h + C \ln p$ або $y = e^{A} h^{B} p^{C}$. Оцінювання параметрів A , B , C здійснювалося методом найменших квадратів окремо як для граничних напружень на периферії/центральної області ППП (табл.2.4, 2.5), так і для кожної моди коливань 1–4 (табл.2.7, 2.8).

Таблиця 2.7 – Власна частота коливань перфорованої пластини
з різними типами ОЕ (шахове розташування ОЕ)

Мода	ОЕ з трикутним профілем			ОЕ з профілем напівколо			ОЕ з профілем прямокутним		
	Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм		
	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1
Без додаткової маси (без СЗМ)									
1	37,5	60,2	67,5	42	66,2	73	39,8	63,2	70,2
2	64,4	98,1	111,5	72,1	108	120,5	68,3	103,1	115,8
3	86,2	128,7	153,1	96,2	141,6	165,8	91,3	135,4	159,5
4	111,1	159,9	182,7	124,5	176,1	197,5	118,3	168,3	189,9
СЗМ соняшнику									
1	28,2	45,2	51	32,1	51,5	58,1	29,8	48	54,3
2	48,7	74,4	84,6	55,6	84,9	96,4	51,7	79,1	89,8
3	65,5	97,8	116,3	74,5	111,6	132,7	69,5	104,1	123,7
4	84,6	121,8	138,6	96,6	139	158,1	90,2	129,7	147,4
СЗМ кукурудзи									
1	31,3	46,8	51,7	35,8	53,4	59	33,3	49,8	55
2	53,5	75,5	85	60,9	86,2	96,9	56,7	80,4	90,3
3	71,2	98,9	116,7	81,1	112,8	133,2	75,4	105,4	124,4
4	91,6	122,6	139,4	104,6	140	158,7	97,6	130,8	148,1

Таблиця 2.8 – Власна частота коливань перфорованої пластини
з різними типами ОЕ (рядне розташування ОЕ)

Мода	ОЕ з трикутним профілем			ОЕ з профілем напівколо			ОЕ з профілем прямокутним		
	Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм		
	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1
Без додаткової маси (без СЗМ)									
1	41,3	66,2	74,3	47	74,1	81,8	44,2	70,2	77,9
2	70,8	108	122,7	80,7	120,9	134,1	75,8	114,4	128,6
3	94,8	141,6	168,4	107,7	158,6	185,7	101,3	150,3	177,1
4	122,2	175,9	201	139,5	197,2	221,2	132,3	186,8	210,8
СЗМ соняшнику									
1	48,8	58	66,9	55,5	66	76,5	51,9	61,6	71,2
2	78,2	91,2	103,7	89	103,7	118,4	83,2	96,9	110,2
3	100,9	130,8	160,4	114,9	149	183,1	107,4	138,9	170,4
4	121,6	142,4	163	138,5	162,3	186	129,4	151,5	173,2
СЗМ кукурудзи									
1	51,2	59,5	67,7	58,3	67,7	77,1	54,6	63,2	71,7
2	79,6	91,9	104,2	90,7	104,8	118,9	84,8	97,9	110,7
3	102,5	131,8	160,7	116,8	150,2	183,5	108,9	140,3	171
4	122,8	143,2	163,3	139,9	163,2	186,4	130,7	152,4	173,6

Отримані рівняння для опису зміни граничних напружень мають вигляд:

- для периферійних зон ППП з рядним розташуванням ОЕ

$$\ln \sigma = 2.0146 - 0.6374 \ln h + 0.2233 \ln p, \quad (2.62)$$

- для периферійних зон ППП з шаховим розташуванням ОЕ

$$\ln \sigma = -1.8009 - 1.1796 \ln h + 0.936 \ln p, \quad (2.63)$$

- для центральної зони ППП з рядним розташуванням ОЕ

$$\ln \sigma = 0.9191 - 0.6374 \ln h + 0.2229 \ln p, \quad (2.64)$$

- для центральної зони ППП з шаховим розташуванням ОЕ

$$\ln \sigma = -2.8998 - 1.1711 \ln h + 0.9361 \ln p. \quad (2.65)$$

Отримані рівняння для опису зміни частоти власних коливань мають вигляд:

$$\ln \omega_n = A_n + B_n \ln h + C_n \ln p, \quad (2.66)$$

де n – номер моди.

Для заданих мод коливань (табл.2.6) отримані наступні значення коефіцієнтів.

Таблиця 2.9 – Коефіцієнти рівняння зміни частоти власних коливань ППП для ОЕ з профілем напівкола

Тип розташування ОЕ	Мода	Коефіцієнти		
		A	B	C
Рядне	1	3.5524	0.5055	0.1426
	2	4.4401	0.5118	0.0609
	3	4.9421	0.866	0.0484
	4	5.0510	0.5525	0.0319
Шахове	1	1.8741	1.1313	0.4134
	2	2.6831	1.0012	0.351
	3	3.1362	1.0146	0.322
	4	3.4391	0.8677	0.2995

Аналіз отриманих даних (табл.2.4, 2.5) та рівнянь (2.62)-(2.65) свідчить, що граничні напруження масштабуються приблизно як на периферії ППП, так і в центрі. Зменшення товщини ППП (внаслідок зношення) на 33-37,3% (з 1 мм до 0,6

мм) збільшує граничні напруження майже удвічі. При цьому зміна СЗМ та тиску на ППП (192Па/250Па) дає помірне зростання напружень до 15-15,5%.

Власні частоти коливань ППП також зменшуються при зношенні ППП за товщиною. Причому нижчі моди мають менший показник чутливості до цього, про що свідчать значення коефіцієнту B (табл.2.9), а вищі - більший. Зміна СЗМ або тиску p (коефіцієнт C в табл.2.9) забезпечує незначний вплив на частоти коливань ППП. Це вказує на незначне мембранне піджорстчення при навантаженні ППП ЗСМ.

Отримані моделі демонструють високу узгодженість із даними (для частот $R^2=0,998\dots0,999$; для напружень $R^2=0,911-0,99$).

Для практичного застосування використання даної методики (МСЕ-моделювання) є тривалим процесом. Для систематизації отриманих даних скористаємося аналітичними основами визначення частоти власних коливань пластин. Для цього прийємо декартову систему координат x, y, z , згідно якої прямокутна пластина (ППП) має довжину a (ox), ширину b (oy) і товщину h (oz).

Рівняння коливань в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява має вигляд [165]:

$$D\Delta\Delta\omega + \rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = q, \quad (2.67)$$

де ω – прогин пластини; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жорсткість; ρ – щільність матеріалу; $q(x, y, t)$ – інтенсивність поперечного навантаження; E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона; $\Delta = \frac{1}{H_1 H_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H_1}{H_2} \frac{\partial}{\partial y} \right) \right]$ – узагальнений оператор Лапласа; H_1, H_2 – параметри Ламе.

При прийнятих граничних умовах, коли $H_1 = H_2 = 1$ маємо:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (2.68)$$

Власні коливання закріпленої пластини зі сторонами a, b дорівнюють:

$$\omega = \omega_0 \sin \frac{\pi m}{a} x \sin \frac{\pi n}{b} y, \quad (2.69)$$

де m, n – кількість напів хвиль відносно вісей x і y , відповідно ($m, n = 1, 2, 3, \dots$).

Кінцевий вираз урахуванням умов ($\omega = \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$) має вигляд [165]:

$$\omega = \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}}. \quad (2.70)$$

Використання метода С. Одмана [177] дозволяє спростити (2.70) до вигляду:

$$\omega = \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (2.71)$$

де α – коефіцієнт частоти, який враховує кількість напівхвиль (m, n) і співвідношення сторін пластини (a/b). В [177.] наведені розрахунки для співвідношення сторін $a/b=1,0; 1,5; 2$.

Наявність перфорації на ОЕ в пластині можна змоделювати шляхом введення в (2.70) поправочного коефіцієнта (K_p), який узагальнено урахує конструктивні параметри дослідних ППП:

$$\omega = \frac{K_p \alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}. \quad (2.72)$$

В даному випадку значення $K_p = 1$ буде відповідати суцільній (не перфорованій та без ОЕ) пластині. Позитивну практику використання подібних поправочних коефіцієнтів відображена в [107, 162].

Поправочні коефіцієнти для заданих умов можна визначити за виразом:

$$K_{p\omega} = (\omega_{EVS} / \omega_{ES}), \quad (2.73)$$

де ω_{EVS} – частота власних коливань ППП об'ємної структури; ω_{ES} – частота власних коливань суцільної пластини.

Враховуючі данні з [107] для базової ППП і визначені чисельно частоти власних коливань для ППП з різними типами ОЕ (табл.2.7, 2.8) отримуємо значення коефіцієнта коливань для заданих умов дослідження (табл.2.10).

Отримана методика дозволяє за допомогою коефіцієнтів $K_{p\omega}$ прогнозувати зміни частоти власних коливань ППП в залежності від типу ОЕ та їх розташування.

Таблиця. 2.10 – Поправочний коефіцієнт частоти власних коливань ППП різних типів (s=1мм, СЗМ соняшнику)

Мода	Частота власних коливань, Гц			K_{po}^*		
	ППП з різним профілем ОЕ* ω_{EVS}			Трикутний профіль ОЕ	Напівколо профіль ОЕ	Прямокутний профіль ОЕ
	Трикутний	Напівколо	Прямокутний			
1	<u>51</u>	<u>58,1</u>	<u>54,3</u>	<u>0,92</u>	<u>1,05</u>	<u>0,98</u>
	66,9	76,5	71,2	1,21	1,381	1,29
2	<u>84,6</u>	<u>96,4</u>	<u>89,8</u>	<u>1,23</u>	<u>1,41</u>	<u>1,31</u>
	103,7	118,4	110,2	1,51	1,73	1,61
3	<u>116,3</u>	<u>132,7</u>	<u>123,7</u>	<u>1,49</u>	<u>1,7</u>	<u>1,58</u>
	160,4	183,1	170,4	2,05	2,34	2,18
4	<u>138,6</u>	<u>158,1</u>	<u>147,4</u>	<u>1,6</u>	<u>1,83</u>	<u>1,71</u>
	163	186	173,2	1,89	2,15	2,01

* - чисельник/знаменник – шахове/рядне розташування ОЕ

Дослідження витривалості ППП.

У зв'язку з наявністю вібрації проведемо додаткові дослідження витривалості ППП об'ємної структури.

Динамічне підсилення ППП можна оцінити за виразом [178, 179]:

$$\sigma_{max}^{dyn} = DAF \sigma_{max}, \quad (2.74)$$

де σ_{max}^{dyn} – пікове динамічне напруження; DAF – динамічний підсилювач; σ_{max} – максимальне напруження ППП (табл.2.4, 2.5).

Для одномасової системи при гармонічному збудженні DAF пов'язують із частотним відношенням $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ і коефіцієнтом демпфування ζ [178, 179]:

$$DAF(r, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}, \quad (\text{поза резонансом при } r \neq 1). \quad (2.75)$$

З урахуванням даних відомих досліджень та отриманих даних модального аналізу приймаємо DAF в інтервалі 1-1.5.

Для експлуатаційного режиму з піками від 0 до σ_{max} (коефіцієнт асиметрії $R \approx 0$) маємо:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{max}^{dyn}}{2} = \frac{DAF}{2} \sigma_{max}, \quad (2.76)$$

де σ_a, σ_m – ампліудна та середня складові циклу напруження.

Ефективну межу витривалості ППП з ОЕ та отворами можна визначити з базової межі витривалості σ'_e з урахуванням множників Маріна [180] та впливу концентрації напружень:

$$\sigma_e^{eff} = \frac{\sigma_e}{K_f}, \quad (2.77)$$

де $K_f = 1 + q(K_t - 1)$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, що комплексно урахує вплив отворів та ОЕ; K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації; $q = \frac{1}{1+a/\rho'}$ – чутливість матеріалу за Петерсоном (матеріальна стала a і локальний радіус ρ' у корені концентратора) [179]:

$$\sigma_e = \sigma'_e k_a k_b k_c k_d k_e, \quad (2.78)$$

де k_a – шорсткість (емпірично залежить від σ_{UTS} і класу поверхні); k_b – розмір (для вигину типові степеневі залежності ($k_b = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-m_b}$)); k_c – вид навантаження (вигин/розтяг); k_d – температура; k_e – надійність (квантиль); $\sigma'_e \approx 0.5\sigma_{UTS}$, де σ_{UTS} – тимчасовий опір (границя міцності при розтягу).

Перевірку витривалості ППП виконували за лінійним діаграмним критерієм Гудмана (лінійна діаграма середнього напруження) [180]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e^{eff}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \leq 1. \quad (2.79)$$

Для сталі $\sigma_{UTS}=400$ МПа (табл.2.2), а межа витривалості пластини у вигині складає $\sigma'_e \approx 0.5\sigma_{UTS} = 200$ МПа. Множники Маріна (типові для оброблених пластин малої товщини) становлять: $k_a \cong 0.8, k_b \cong 0.85, k_c = 1, k_d = 1, k_e \cong 0.87$.

Тоді за (2.78) маємо $\sigma_e = 118.3$ МПа.

Вплив отворів/ОЕ враховано через коефіцієнт K_f , який розраховано при $K_t \approx 2.5$ і $q \approx 0.6$ (помірна галтель між ППП та ОЕ): $K_f = 1.9$.

Тоді за (2.77) маємо $\sigma_e^{eff} = 62.33$ МПа.

Розглянемо найгірший (з точки зору витривалості) випадок, який згідно з (табл.2.5) відповідає ППП з рядним розташуванням ОЕ з трикутним профілем для СЗМ кукурудзи, зона периферійна А та товщиною $h=0.6$ мм.

З урахуванням динамічного підсилювача (Dynamic Amplification Factor) за умовою (2.79) проведемо розрахунки та перевірку міцності для найгіршого варіанту: трикутний профіль ОЕ, СЗМ кукурудзи, $h=0,6\text{мм}$ (табл.2.11).

Таблиця 2.11 – Перевірка витривалості ППП за критерієм Гудмана

Розташування ОЕ	σ_{max} , МПа	DAF	LHS _{Goodman}
рядне	62,7	1	0.576
		1,25	0.72*
		1,5	0.864
Шахове	68,9	1	0.634
		1,25	0.792
		1,5	0.951

*Приклад розрахунку DAF=1,25: $\sigma_{max}^{dyn} = 78.4$ МПа, $\sigma_a = \sigma_m = 39.2$ МПа,

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e^{eff}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} = \frac{39.2}{63} + \frac{39.2}{400} = 0.72 < 1 \text{ - умова виконується}$$

Для випадку використання ППП з шаховим розташуванням ОЕ (трикутного профілю) за умови зношення до товщини 0,6 мм та DAF=1,5 ми спостерігаємо наближення до граничного значення умови витривалості. Проте більшість інших варіантів ППП залишається на межі прийнятності.

Аналіз табл. 2.7–2.8 доводить діапазони власних частот коливань ППП з шаховим розташуванням ОЕ – $\omega_{n,1} \geq 30\text{--}35$ Гц і $\omega_{n,1} \geq 48\text{--}58$ Гц – ППП з рядним розташуванням.

З урахуванням частоти вимушених коливань характерної для вібраційного решетного обладнання [6, 20] $\omega=10\text{--}15$ Гц маємо частотне відношення: $r = 0.28\text{--}0.5$ – для шахового розташування ОЕ; $r = 0.17\text{--}0.31$ – для рядного розташування ОЕ. До найгірших випадків віднесемо частоти коливань ППП з шахових розташуванням ОЕ трикутного профілю ($r = 0.4\text{--}0.53$).

Тоді, використавши (2.75) та для $\zeta=2\%$ визначимо DAF в залежності від частотного відношення r (табл.2.12).

Таблиця 2.12. Залежність DAF від частотного відношення r ($\zeta=2\%$)

r	0.3	0.4	0.5
DAF	1.1	1.19	1.32

Таким чином, вдалося ідентифікувати реальні DAF (в діапазоні 1.10–1.33), що дозволяють проводити аналіз витривалості ППП.

Для практичного застосування результатів проведемо визначення мінімальної товщини ППП h_{min} за обмеженням напружень:

$$h_{min} = \left(\frac{\sigma^*}{k}\right)^{1/b}, \quad (2.80)$$

що задовольняє $\sigma_{max} \leq \sigma^* = 0.6\sigma_e^{eff} = 37.8$ МПа; де $k = e^a$ – масштабний коефіцієнт; b – показник скейлінгу; σ^* – цільовий пік, що забезпечує запас до межі витривалості.

Порогові значення товщини ППП з рядним та шаховим розташуванням ОЕ різних типів для зони А представлено в табл.2.13.

Таблиця 2.13 – Порогові значення товщини ППП об'ємної структури

СЗМ	Профіль ОЕ	Порогові значення товщини ППП h_{min} , мм*	
		Рядне розташування ОЕ	Шахове розташування ОЕ
Соняшник	напівколо	0.599	0.651
	прямокутний	0.663	0.727
	трикутний	0.725	0.801
Кукурудза	напівколо	0.777	0.799
	прямокутний	0.8	0.895
	трикутний	0.875	0.92

* приклад розрахунку ППП з рядним розташування ОЕ трикутного профілю з СЗМ кукурудзи починаємо з оцінювання параметрів за 3 точками $(h, \sigma) = (1, 31.1), (0.8, 43.7), (0.6, 62.7)$, що дає $b = -1.37$, $k \cong 31.6$ та $h_{min} = \left(\frac{37.8}{31.6}\right)^{1/(-1.37)} = 0.88$ мм.

Аналізом таблиці 2.13 встановлено, що шахова схема підвищує піки на $\approx +10\%$ порівняно з рядною, що збільшує граничні товщини ППП на $+0.07 \dots +0.11$ мм залежно від профілю. Найменше значення товщини ППП, яка забезпечить витривалість конструкції, стосується ОЕ з профілем у вигляді напівкола.

2.3. Висновки за розділом

1. За допомогою розробленої гідродинамічної модель руху СЗМ, в якій ураховано псевдозрідження шару, «сухо-фрикційну» складову зсувних напружень, вплив ОЕ через коефіцієнт структурності K_v у профілі концентрації, що дало змогу отримати узагальнені рівняння швидкості СЗМ та продуктивності ППП.

2. Кількісна ідентифікація структурного ефекту ОЕ, врахування конструктивних та кінематичних параметрів ППП дозволила отримати: поля швидкості СЗМ кукурудзи (0,47–0,61 м/с) та соняшнику (0,34–0,69 м/с), продуктивність ППП до 7,92 кг/с (кукурудза) та до 4,41 кг/с (соняшник).

3. Вплив профілю ОЕ: вперше виявлено вплив типу ОЕ та його розташування на динамічні показники СЗМ. Доведено, що трикутний профіль ОЕ дає найменше зниження швидкості порівняно з напівкруглим і прямокутним, та максимальну продуктивність (перевага на 1,1–6 % для СЗМ кукурудзи та на 1,2–9,19 % для СЗМ соняшнику). Використання узагальненого коефіцієнту K_v дозволяє комплексно врахувати вплив геометрії та розташування ОЕ на ППП та керувати процесом сепарування компонентів СЗМ.

4. Чисельними методами досліджено показники надійності ППП об'ємної структури: напруження, частоти власних коливань та витривалість, з варіюванням типу ОЕ, типу СЗМ та параметрів ППП.

5. Використанням моделювання МСЕ удосконалено підхід «напруження–товщина ППП» із валідацією регресії та схемою перфорація та наявність ОЕ. Для ППП з ОЕ отримано степеневі закони $\sigma(h)=k h^b$ з високою збіжністю ($R_{\log^2} > 0,99$) і фізично обґрунтованими показниками $b \in [-1,395; -1,219]$. Показано, що перехід 1,0→0,6 мм підвищує пікові напруження периферійної зони А на 88-102 % та центральної зони В на 87-104%. Шахова схема розташування ОЕ в середньому дає до 10 % пікових напружень порівняно з рядною схемою.

6. Новизна методики втомної перевірки ППП з ОЕ полягала в комплексному використанні методу Гудмана та DAF із прив'язкою до власних частот. Вперше

для ППП з ОЕ виконано системне узгодження критерія Гудмана із встановленим динамічним підсиленням DAF на основі визначених власних частот мод 1–4. Встановлені граничні значення товщини ППП, що забезпечують цільовий рівень $\sigma_{\max} \leq 0,6 \sigma_{\text{eff}}$ для ППП з рядним/шаховим розташуванням ОЕ та навантаженням СЗМ кукурудзи/соняшнику – який склав 0,6-0.92 мм. Така інтеграція вперше задає частотно-залежний проектний DAF, безпосередньо пов'язаний із отриманими частотами власних коливань ППП.

7. Для подальшого практичного використання вперше запроваджено поправочні коефіцієнти частот $K_{r\omega}$, що дозволяють перераховувати власні частоти коливань від базових суцільних пластин до ППП з різними типами ОЕ та схемами їх розташування.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані аналітичні та чисельні моделі, які описують динаміку СЗМ на ППП та їх надійність, отримані за певних умов та припущеннях. Крім того прийнятні величини, поправочні коефіцієнти зокрема, потребують експериментальної ідентифікації.

3.1. Програма експериментальних досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є перевірка адекватності та підвищення точності отриманих моделей, встановлення закономірностей зміни показників технологічної ефективності та надійності ППП об'ємної структури, багатокритеріальна оптимізація параметрів ППП.

Обрані наступні завдання експериментальних досліджень:

1. Перевірка адекватності розроблених моделей.
2. Ідентифікація динамічних показників СЗМ на ППП та визначення технологічної ефективності процесу сепарування СЗМ;
3. Ідентифікація показників надійності ППП об'ємної структури;
4. Визначення раціональних параметрів ППП об'ємної структури.

При цьому змінними факторами вважали параметри ОЕ та їх розташування, кінематичні параметри ППП, властивості СЗМ.

Відповідно до завдань приймаємо наступну програму досліджень:

1. Визначення динамічних показників СЗМ та продуктивності ППП.
2. Визначення частоти власних коливань та показників надійності ППП;
3. Визначення раціональних значень параметрів ОЕ ППП.

Експериментальна ідентифікація проводилася за наступним алгоритмом: перевірка адекватності аналітичних та чисельних моделей → пошук раціональних значень параметрів ППП та їх співвідношень між собою → уточнення даних за рахунок тривалої експериментально-виробничої перевірки.

При виконанні досліджень опиралися на загальноприйняті та рекомендовані стандартами методики [181-183]. Увагу приділено однотипності та багаторазовості проведення дослідів, отримання достатнього відхилення даних.

Для обробки даних використано методики статистики [181, 184, 185] з визначенням оціночних показників: середнє арифметичне та середнє квадратичне відхилення; дисперсія та коефіцієнт варіації, тощо.

При проведенні дослідів відбувалася ідентифікація наступних параметрів:

- а) кінематичні параметри коливань ППП (амплітуди та частоти коливань);
- б) тривалість досліду;
- в) частоти власних коливань ППП;
- г) вага проходового та сходового компоненту СЗМ;
- д) властивості СЗМ (розміри компонентів та їх щільність, пористість);
- е) швидкість руху СЗМ.

Деякі з цих параметрів (частота та амплітуда коливань, вага, час досліду і т.п.) є результатом безпосереднього заміру вимірюваним обладнанням з точністю відповідною до їх характеристик.

Інші параметри (частоти власних коливань, швидкість СЗМ, продуктивність ППП і т.п.), які визначали, є результатом непрямих замірів і визначається не тільки характеристиками приладів, а й обраною методикою ідентифікації. Проведена оцінка похибок при дослідженнях дозволила забезпечити необхідну точність експериментальної ідентифікації.

3.2. Опис об'єктів дослідження

При проведенні досліджень об'єктами стали лабораторне обладнання (типове та розроблене), плоскі та циліндричні ППП з ОЕ, СЗМ.

3.2.1. Лабораторне обладнання для дослідження динаміки СЗМ.

Для можливості поширення результатів досліджень експериментальна ідентифікація динамічних показників СЗМ проводилася на лабораторних

установках з плоскими та циліндричними ППП. Головними вимогами до лабораторного обладнання стало можливість регулювання дослідних параметрів (факторів) та відповідність до серійного промислового сепарувального обладнання.

Дослідження динаміки СЗМ на плоских ППП

Дослідження динаміки СЗМ на ППП об'ємної структури проведено на лабораторному плоскорешетному сепараторі (рис.3.1, табл.3.1).

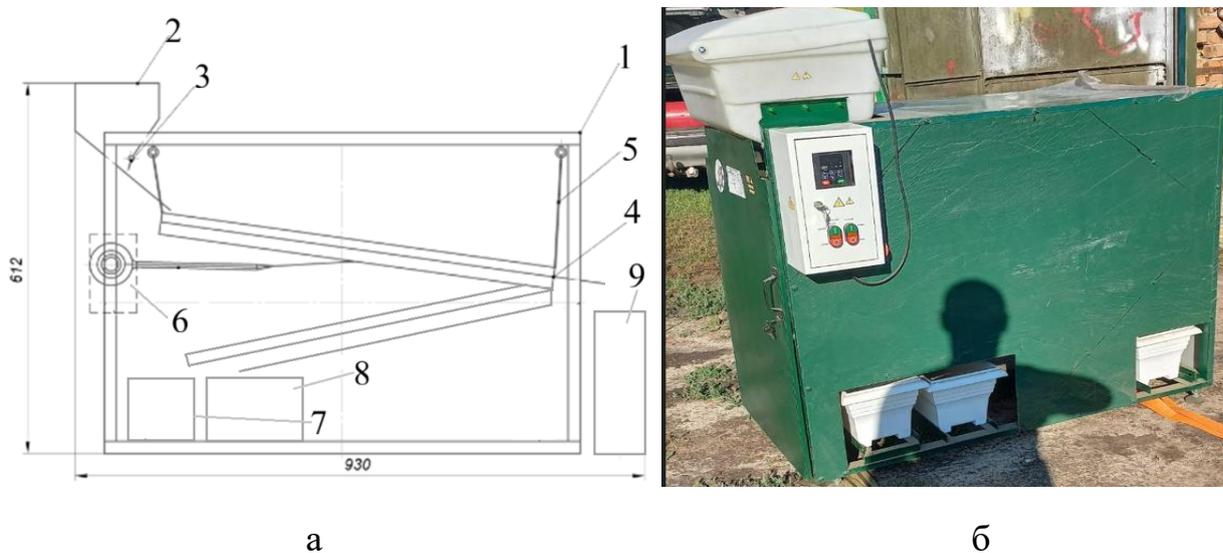


Рисунок 3.1 – Схема (а) та загальний вигляд (б) лабораторного плоскорешетного сепаратора: 1 – рама; 2 – бункер завантажувальний; 3 – дозатор; 4 – решетний блок; 5 – підвіси еластичні; 6 – привод коливань; 7-9 – лотки фракцій

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики плоскорешетного сепаратора

Характеристики	Значення
Потужність електродвигунів (завантаження/решет.стан), кВт	0,25/0,55
Площа ППП, м ²	0,8
Кількість ППП, шт.	2
Кут нахилу ППП, градусів	8
Амплітуда коливань, мм	7/9/11
Частота коливань, Гц	0-20
Габаритні розміри, м	1,2×0,6×0,5

Лабораторний плоскорешетний сепаратор складається з наступних основних вузлів (рис.3.1): рама 1, бункер завантажувальний 2, дозатор 3, решетний блок 4 з решетами та системою очищення отворів, еластичні підвіси 5, привода коливань 6 та лотків для фракцій 7,8. Решета здійснюють поздовжньо-поступові коливання за допомогою шатуна та ексцентрику. Технологічний процес роботи лабораторного сепаратору наступний. СЗМ з бункеру 2 подається через дозатор 3, де обмежується його кількість, а далі на решетний блок 4. За допомогою привода 6 решета вібрують, а компоненти СЗМ поділяються на дві фракції (сходову та проходову), які направляються до лотків 7,8.

На лабораторному плоскорешетному сепараторі здійснюється незалежне регулювання наступних параметрів: частоти коливань – частотним перетворювачем Freson-FR150A-2S-0.7B; амплітуди коливань – заміною ексцентриків (рис.3.2) з різною відстанню від осі; питомого завантаження (продуктивності) за допомогою дозатора 3. Для спостереження за процесом сепарування СЗМ бокова поверхня корпусу сепаратора виконана прозорою з оргскла.

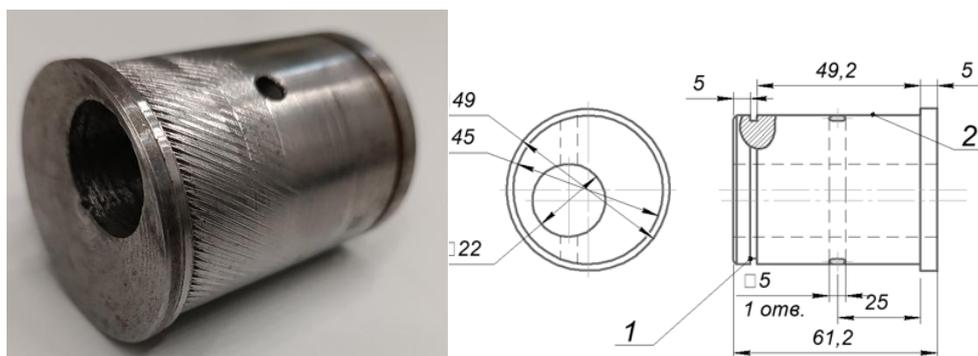


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд та схема ексцентриків для регулювання кінематики ППП

Дослідження динаміки СЗМ на циліндричних ППП

Для визначення динамічних показників СЗМ на циліндричних ППП використано лабораторний вібровідцентровий сепаратор (рис.3.3, табл.3.2).

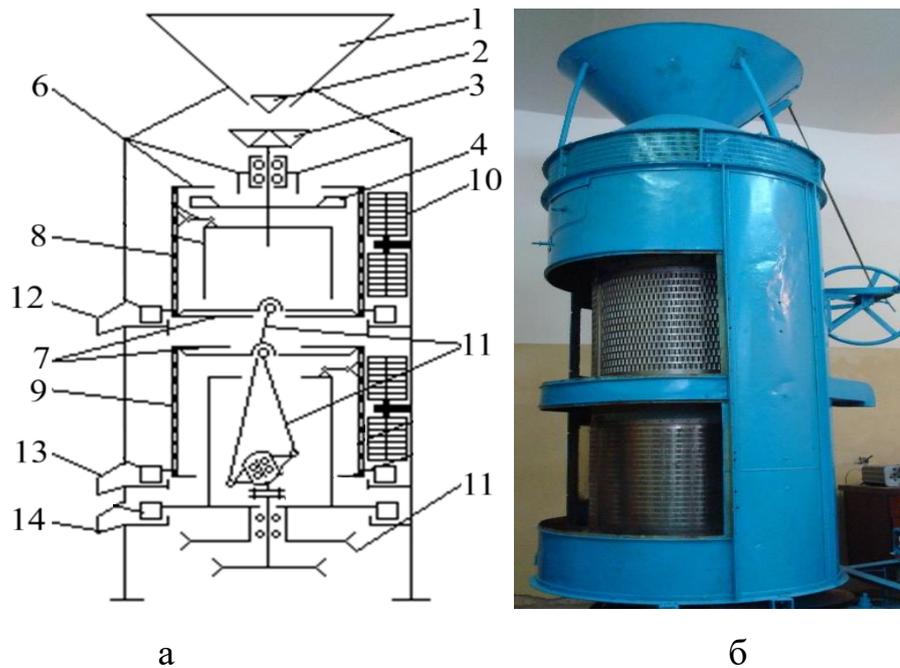


Рисунок 3.3 – Схема (а) та загальний вигляд (б) лабораторного вібровідцентрового сепаратора: 1 –бункер завантажувальний; 2 – дозатор; 3, 4 – розподільувачі; 5 – ротор; 6,7 –барабани решетні; 8, 9 – перфоровані просіювальні поверхні; 10 – очисники отворів ППП; 11 – привід; 12-14 – лотки фракцій

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики лабораторного вібровідцентрового сепаратора

Характеристики	Значення
Потужність електродвигунів, кВт	4,5
Загальна площа ППП, м ²	1,94
Кількість ППП, шт.	2
Амплітуда коливань, мм	7/8/9
Частота вертикальних коливань, с ⁻¹	0-80
Кутова швидкість, рад/с	0-12
Габаритні розміри, м	1,8x1,2

Основними вузлами та деталями лабораторного сепаратора (рис.3.3) стали: завантажувальний бункер 1, дозатор 2, розподільники 3, 4, ротор 5, решетні барабани 6,7, ППП 8,9, очисники отворів ППП 10, привід 11, лотки фракцій 12-14. На верхній барабан 6 встановлюється ППП підсівна 8, а на нижній барабан 7

– ППП сортувальна 9. За допомогою приводу 10 ППП обертаються навколо та коливаються уздовж вертикальної осі ротору 5.

Технологічний процес відбувається наступним чином. СЗМ з бункеру 1 через дозатор 2 потрапляє на розподілювачі 3, 4. Потрапивши на внутрішню циліндричну ППП СЗМ рухається під діє відцентрових та гравітаційних сил. Компоненти поділені за розмірами направляються в лотки 12-14. Для очистки отворів ППП встановлені фрикційні гумові очисники 10. Для регулювання питомого навантаження (продуктивності) сепаратора встановлений дозатор 2 та указник рівня.

Лабораторний вібробвідцентровий сепаратор дозволяє варіювати наступні параметри: кінематику ППП (частоту обертання, частоту та амплітуду вертикальних коливань), питома завантаження ППП.

3.2.2. Перфоровані просіювальні поверхні.

Для досліджень ефективності ППП об'ємної структури використані конструкції базові (рис.3.4а) та розроблені з ОЕ (рис.3.4б-г). При цьому програмою експериментів передбачалося визначення впливу типу ОЕ та їх розташування (шахового або рядного) на плоских та циліндричних ППП.

Серед дослідних ОЕ, які встановлені на місці деяких отворів, експериментальна перевірка проведена для профілів трикутного, прямокутного та напівкола (рис.3.4).

Для досліджень використано ППП з наступними параметрами представленими в табл.3.3, а також з варіюванням параметрів ОЕ (табл.3.4).

Плоска ППП представлена у вигляді прямокутної пластини, а циліндрична ППП двох напівциліндрів, що поєднані між собою.

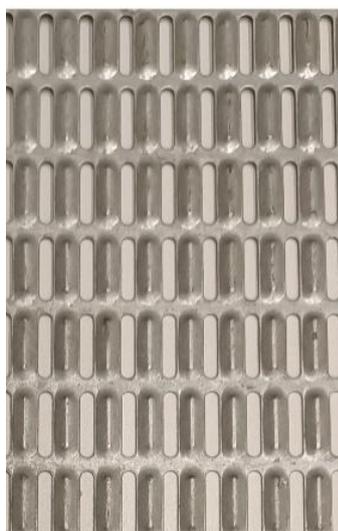
В якості матеріалу ППП використано холоднокатану листову сталь за ГОСТ 16523-97.

Конструктивні та кінематичні параметри плоского та циліндричного ППП прийняті відповідно до характеристик серійних зерноочисних машин та сепараторів [6, 20].

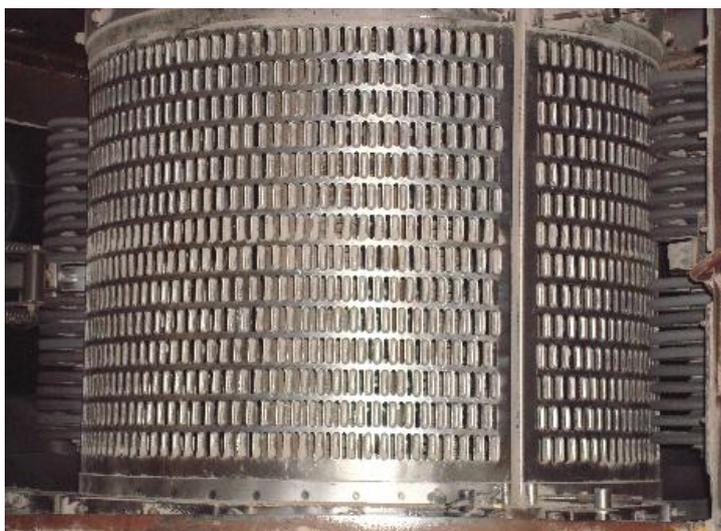


а

б



в



г

Рисунок 3.4 – Окремі дослідні зразки ППП: а – базові з продовгуватими отворами; б – плоскі з шаховим розміщенням ОЕ з профілем у вигляді напівколо; в – плоскі з рядним розміщенням ОЕ з профілем у вигляді напівколо; г – циліндричні з шаховим розміщенням ОЕ з профілем у вигляді напівколо

Таблиця 3.3 – Параметри дослідних ППП

Тип ППП	Параметри	Значення
Плоскі	Довжина, м	0,75
	Ширина, м	0,25
	Розміри отворів, мм	2,4×20 / 4×25
	Товщина поверхні, мм	0,6/0,8/1,0
Циліндричні	Радіус, м	0,3075
	Довжина, м	0,5
	Розміри отворів, мм	3×20 / 5×20
	Товщина поверхні, мм	0,6 / 0,8 / 1

Таблиця 3.4 – Параметри ОЕ

Тип ОЕ	Форма ППП	Розміри, мм		
		висота	ширина	довжина
напівколо	Плоска/ циліндрична	1-5	2,4; 4	15
трикутний				
прямокутний				

Щоб мінімізувати зменшення «живої» площі ППП, ширина ОЕ підбрана відповідно до технологічної ширини отворів (2,4мм для СЗМ соняшнику і 4мм для СЗМ кукурудзи) і є фіксованим параметром. У дослідженнях висота ОЕ варіювалася з урахуванням технологічних можливостей холодного штампування ППП. Параметри ОЕ з різною формою поперечного перерізу наведені в таблиці 3.4.

3.2.3. Сипкі зернові матеріали.

Експериментальні дослідження проведені для СЗМ двох найпоширеніших с.г. культур: соняшнику (Армагедон ранньостиглий ІМІ-гібрид ВНІС) та кукурудзи (Любава 279 МВ - гібрид української селекції Інституту зернового господарства НААН України).

Визначення фізико-механічних властивостей СЗМ проведено з використанням загальноприйнятих методик, а також стандартів ДСТУ, ISO [186-189].

Вологість СЗМ визначали на вологомір Unimeter Digital (рис.3.5): точність: +/- 0,5%; метод вимірювання – електропровідність; діапазон робочих температур 0 – 50 °С; діапазон вимірювання 10,6 – 44,0 (кукурудза) і 5,6 – 24 (соняшник).

Фракційний склад та розмірні характеристики компонентів СЗМ визначали за допомогою лабораторного просіювача SS типу 205/1 (рис.3.6) [190]: розмір перфорованих решет 200 мм, їх кількість 7 штук; напрям коливань – вертикальний; максимальний час просіювання – 60 хв.; габарити машини: 350 мм/300мм/ 650 мм; вага – 35 кілограмів.



Рисунок 3.5 – Вологомір СЗМ



Рисунок 3.6 – Лабораторний просіювач вихідного СЗМ

Для штучного створення вихідної суміші СЗМ (20% домішкового та 80% основного компоненту) на просіювачі SS проведений ситовий аналіз та відділення компонентів за розмірною ознакою – ширина. Для дослідних СЗМ кукурудзи та соняшнику саме цей розмір характеризує форму компонентів та може бути описаний відповідним коефіцієнтом [97, 191]:

$$k_f = a_{ш} / a_m \quad (3.1)$$

де $a_{ш}$, a_m – ширина і товщина компоненту.

Ширину і товщину компонентів СЗМ додатково ідентифікували на мікроскопі Opta-tech×2000: збільшення 1:10/0,8×–8×; відстань між окулярами 45–76 мм; планахроматична лінза; поле зору 10 × 22 мм; світлодіодне освітлення.

3.3. Методика експериментальних досліджень

3.3.1. Методика визначення технологічної ефективності ППП. Дослідження передбачали визначення продуктивності ППП при фіксованих значеннях повноти поділу компонентів СЗМ (якості сепарування).

Методика передбачала наступні етапи: попереднє штучне приготування СЗМ (п.3.2.3), встановлення конструктивна-кінематичних параметрів лабораторних сепараторів (п.3.2.1) відповідно до плану експерименту, застосування заданої дослідної ППП об'ємної структури (п.3.2.2), аналіз вмісту

лотків- приймачів, статистична обробка даних.

До параметрів лабораторних сепараторів, які підлягали варіюванню при дослідженнях, віднесено: пито́ме завантаження (за допомогою відтарованої заслінки механічної), амплітуди та частоти коливань ППП (частотні перетворювачі та набір ексцентриків)

До параметрів, які підлягали ідентифікації за допомогою вимірювальних приладів, віднесено: час сепарування СЗМ, вага вихідного СЗМ та лотків з основним та домішковим компонентом, властивості СЗМ (п.3.2.3).

Для зважування навіски вихідного СЗМ та вмісту лотків використані ваги типу Ohaus Pioneer 520 PR523/E, похибка яких складає ± 1 мг.

До параметрів, які були облічені відносно (табл.3.5): пито́ме завантаження, продуктивність, повнота поділу.

Таблиця 3.5 – Вирази для визначення технологічної ефективності ППП

Показники	Вираз	Пояснення величин
Продуктивність	$Q = \frac{3600(g_{pk} + g_{sk})}{t}$	g_{pk} , g_{sk} – вага домішкового та основного компоненту СЗМ, відповідно; t – час досліду
Пито́ме завантаження	$q = Q/S_{ППП}$	$S_{ППП}$ – площа ППП
Повнота поділу	$\varepsilon_p = g_{pk}/g_{pk}^*$	g_{pk}^* – вага домішкового компоненту у вихідному СЗМ

3.3.2. Методика визначення динамічних показників СЗМ.

Для дослідження швидкості СЗМ використано метод швидкісної відеозйомки та подальшої обробки даних, який успішно проявив себе для ідентифікації динамічних показників сипких матеріалів [35, 192].

Для цього застосована високошвидкісної камери Phantom V9.1 (глибина зображення 14 біт, 1000 кадрів/с, роздільна здатність 1632×1200 пікселів, колірне зображення) [193].

Також бокові стінки лабораторних сепараторів були зроблені з оглядовими вікнами з оргскла з нанесенням розмірних шкал (рис.3.7) [193].



Рисунок 3.7 – Етапи визначення динамічних показників СЗМ на циліндричних (а) і плоских (б) дослідних ППП

Методика передбачала наступні етапи: попереднє штучне приготування СЗМ (п.3.2.3), встановлення конструктивна-кінематичних параметрів лабораторних сепараторів (п.3.2.1) відповідно до плану експерименту, застосування заданої дослідної ППП об'ємної структури (п.3.2.2), відеозйомку руху поміченого компоненту в шарі СЗМ з заданою кількістю кадрів за одиницю часу, аналіз фотографічних зображень, статистична обробка даних.

До параметрів лабораторних сепараторів, які підлягали варіюванню при дослідженнях, віднесено: товщина шару СЗМ (за допомогою відшарованої заслінки механічної), амплітуди та частоти коливань ППП (частотні перетворювачі та набір ексцентриків).

До параметрів, які підлягали ідентифікації за допомогою вимірювальних приладів, віднесено: кількість кадрів за секунду, довжина траєкторії руху компоненту.

До параметрів, які були облічені віднесено (табл.3.6) [193]: питома завантаження, продуктивність, повнота поділу.

Таблиця 3.6 – Вирази для визначення динамічних показників СЗМ

Показники	Вираз	Пояснення величин
Швидкість руху компоненту	$v_k = L_{dk}/t_d$	L_{dk} – дистанція, яку подолав компонент (з фотографічних зображень); t_d – час на подолання дистанцій
Час на подолання дистанцій	$t_d = t_{kf} \cdot k_{video}$	$t_{kf} = 1/n$ – час одного кадру при частоті n кадрів за секунду; k_{video} – кількість кадрів витрачених на подолання дистанції

3.3.3. Методика визначення показників надійності ППП.

Методика визначення показників надійності дослідних ППП передбачала включала тести на зношування, ідентифікація впливових факторів, аналіз даних. При цьому увагу було приділено різним конструктивним особливості ППП (тип та розташування ОЕ) та властивостям СЗМ.

СЗМ є абразивним матеріалом та створює зовнішнє навантаження на ППП, що у комплексі призводить до його зношення за товщиною. Для зручності валідації даних чисельного моделювання (розділ 2.2) питоме навантаження перевели в Па, використавши при цьому властивості СЗМ (параметри шару та щільність).

Зношення ППП відбувається за його товщиною, яка в процесі експлуатації зменшується. Для ідентифікації величини зносу та коефіцієнтів зношування в процесі експлуатації ППП через кожні 2000 годин за допомогою мікрометра Mitutoyo 389-351-30 Digital Micrometer Deep Throat 1 Inch Spc визначали зміну їх товщини від номінальної [194]. Даний мікрометр дозволяє проводити вимірювання товщини листових поверхонь на відстані 300 мм від краю. Після вимірювання товщини в 40 точках (по 10 точок з кожної сторони ППП) проводили усереднення значень.

Знос ППП за товщиною визначається через відповідний вираз [104, 194, 195]:

$$\Delta h(t) = \frac{Cpvt}{\sigma}, \quad (3.2)$$

де: Δh – зменшення товщини ППП, м; C – коефіцієнт зношування, що враховує особливості конструкції ППП та умови експлуатації; p – контактний тиск на ППП від СЗМ, Па; v – відносна швидкість руху СЗМ по ППП, приймаємо $v=0.025$ м/с; t – час експлуатації, с; σ – граничне напруження матеріалу ППП (границя текучості для сталі $\sigma = 2,1 \times 10^8$ Па).

Коефіцієнт зношування C комплексно враховує площу контакту між сипким матеріалом та поверхнею решета, його кут атаки, мікронерівності поверхні решета та його структурність [165]. Тоді, При відомій величині зносу ППП з (3.2) можна знайти коефіцієнт зношування [194]:

$$C = \frac{\Delta h \sigma}{pvt}. \quad (3.3)$$

Граничний ресурс експлуатації ППП залежить від величини критичної товщини. Для врахування впливу конструктивних параметрів треба додати до розрахунку величину, яка буде комплексно враховувати рівень та особливості перфорації ППП. Таким параметром, згаданим у другому розділі, може бути кількість суцільної (неперфорованої у вигляді перегородок) поверхні до так званого «живого» перетину ППП:

$$\varepsilon = 1 - \frac{A_{\text{отв}}}{A_p}, \quad (3.4)$$

де $A_{\text{отв}}$ – площа отворів на ППП, A_p – загальна площа ППП.

Крім того треба ввести додатково коефіцієнт, який буде враховувати наявність ОЕ, яким може бути коефіцієнт складності конструкції β .

Тоді, з урахуванням фундаментальних виразів [104, 196] та запропонованих положень граничний ресурс може бути розрахований за виразом [194]:

$$t_e = \frac{\Delta h \sigma \varepsilon}{C \beta p v}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнт β може бути визначений за виразом [194]:

$$\beta = \delta_\phi + \delta_p + \delta_a, \quad (3.6)$$

де δ_ϕ – поправка, що ураховує форму отвору; δ_p – поправка, що ураховує об'ємну структуру; δ_a – поправка, що враховує анізотропію стирання поверхні.

Також, для оцінки надійності конструкції, яка підлягає зношенню, доцільно використовувати показник швидкості/інтенсивності [165, 194, 195]:

$$v(t) = \frac{\Delta h}{t}. \quad (3.7)$$

Це відносний показник значно полегшує наліз надійності конструкції.

Методика визначення частот власних коливань ППП.

Точність чисельного моделювання (розділ 2.2) залежить від відповідності прийнятих умов (граничних, початкових і т.п.), типу та кількості скінчених елементів до реальних фізичних умов. Для перевірки адекватності розроблених МСЕ-моделей проведемо порівняння модальних чисельних результатів з експериментальними.

Виходячи з результатів аналітичного та чисельного моделювання експериментально дослідимо ППП з профілем ОЕ у вигляді напівколо з шаховим та рядним розташуванням.

Ураховуючи особливості конструктивного монтування ППП в промисловому сепарувальному обладнанні, подібно до чисельних моделей (розділ 2.2) прийнято жорстке закріплення країв ППП (типу СССС). Для цього виготовлення 2 рамки з гвинтовими кріпленням між собою через 100 мм. Це забезпечило рівномірне жорстке закріплення ППП по периметру, що відповідало умовам чисельної моделі.

Під час модального випробування встановлюється функція частотної характеристики для визначення власних частот випробувальної ППП. У фізичному сенсі функція частотної характеристики є мірою реакції системи на відомий вхідний сигнал (зовнішнє збурення).

Для визначення структурної функції частотної характеристики необхідно отримати два канали даних: вхідну збуруючу силу та відповідну реакцію випробуваного об'єкта (ППП). При вимірюванні удару вхідна сила забезпечувалася модальним ударним молотком РСВ 084А17, а вихідна реакція випробуваного об'єкта (ППП) фіксувалася за допомогою акселерометра РСВ 352V10 (рис. 3.8).

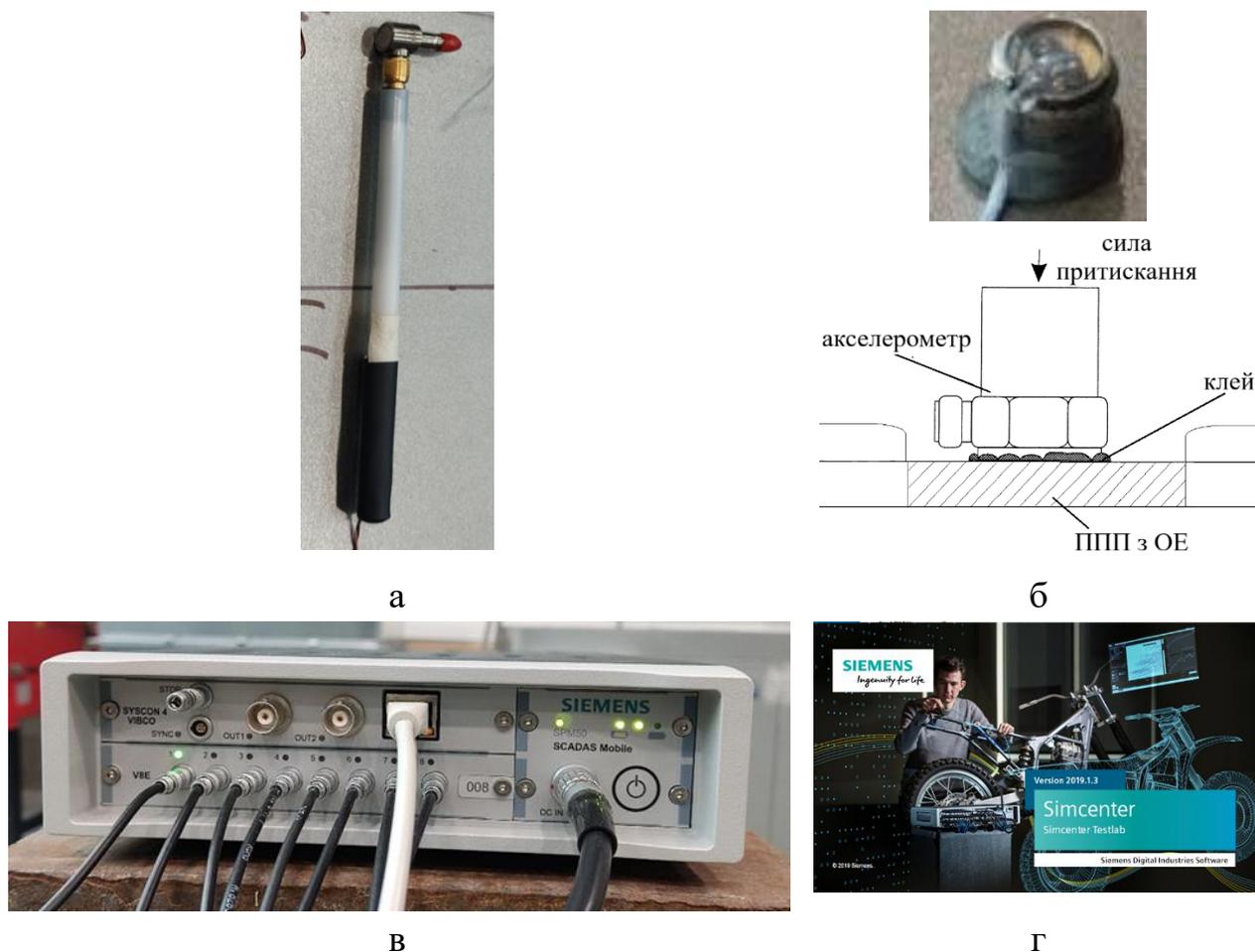


Рисунок 3.8 – Обладнання для експериментального модального аналізу: а – молоток PCB 084A17; б – акселерометр PCB 352V10; в – підсилювач SCADAS Mobile; г – ПК з Simcenter Testlab 2019.1

Отриманий сигнал від акселерометру далі іде на підсилювач SIEMENS моделі SCADAS Mobile, а далі на ПК з програмним забезпеченням Simcenter Testlab 2019.1 для обробки та візуалізації результатів випробувань.

Експериментальна ідентифікація проведена за алгоритмом (рис.3.9):

1. Підготовка до випробувань: граничні умови; визначення схеми та параметрів випробувань; діапазон частот; визначення параметрів сили збудження.

2. Випробування (рис3.9в): установка та контроль акселерометрів; збудження об'єкта та вимірювання частотної характеристики, перевірка якості вимірювань та когерентності.

3. Після випробувань: підгонка модальної кривої; перевірка модальності за критерієм достовірності та модальний синтез.

Дослідження проводилося за таким алгоритмом. Дослідна ППП була жорстко закріплена на збірній рамі (рис.3.9а). При такому типі кріплення досліджувана поверхня по периферії є нерухомою і не може рухатися. ППП була попередньо розмічена шляхом накладання координатної сітки із заданим кроком, що дало змогу отримати 70 точок вимірювання (рис.3.9б). Подібна сітка (з відповідними координатами точок) була введена до Софту Simcenter Testlab 2019.1 (рис.3.9б).

Після проведення експерименту (70 точок збудження) далі проведено обробку даних за допомогою програмного забезпечення Simcenter Testlab 2019.1.

В результаті отримано моди коливань для заданої конструкції ППП з відповідною їх візуалізацією (рис.3.10).

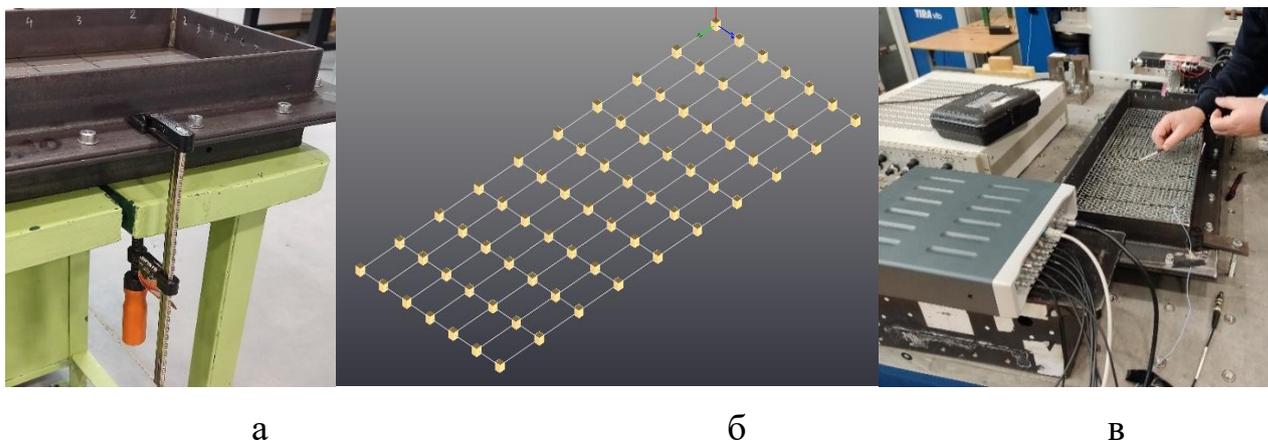
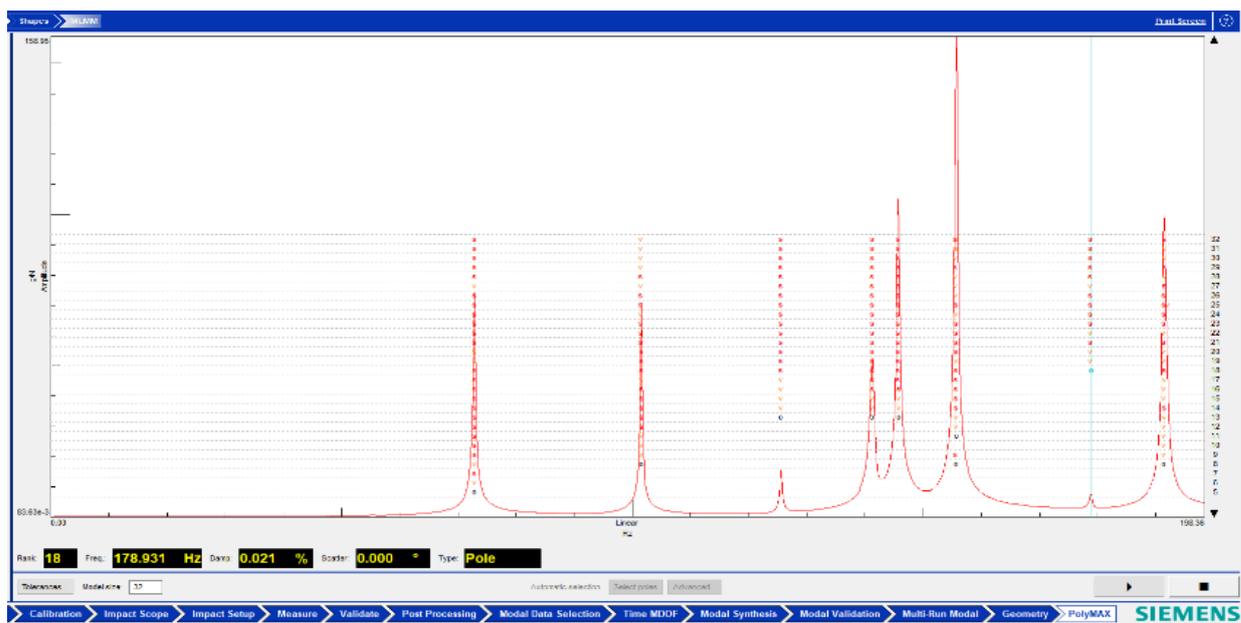
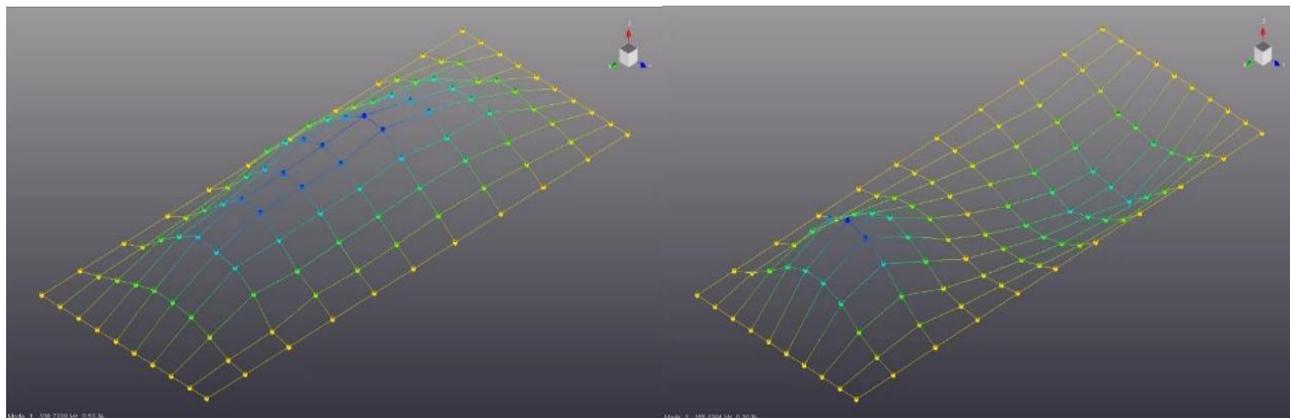


Рисунок 3.9 – Монтаж ППП та проведення експериментів

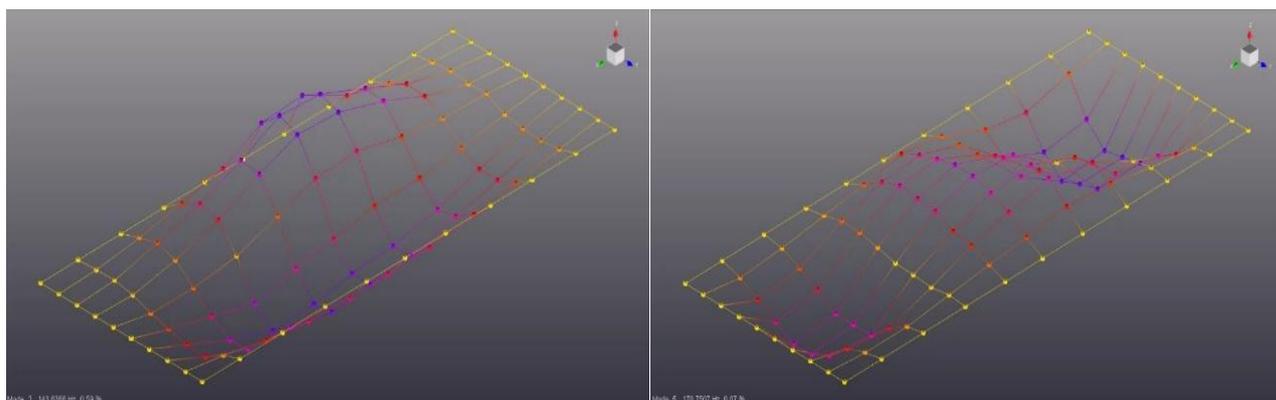


а



б

в



г

д

Рисунок 3.10 – Отримання мод дослідної ППП (а) та приклад їх візуалізації: б – мода 1; в – мода 2; г – мода 3; д – мода 4

Отримані 4 моди частот власних коливань відповідають модам отриманим при чисельному моделюванні (розділ 2.2), що дозволило провести аналіз адекватності.

3.3.4. Методика визначення раціональних параметрів ППП.

Максимальна технологічна ефективність процесу сепарування СЗМ та надійність конструкції ППП може бути досягнута лише за умови оптимального співвідношення її конструктивних параметрів між собою. Вивчення впливу окремих параметрів у відриві один від одного не дає можливості отримати цілісну картину процесу, оскільки його результативність визначається складною взаємодією багатьох змінних. Саме тому виникає необхідність застосування методів математичного планування експерименту, які забезпечують комплексний підхід до вивчення багатofакторних процесів.

Побудова статистично достовірної математичної моделі об'єкта дослідження у вигляді полінома (рівняння регресії) включає наступні етапи [181-183]:

1. попереднє вивчення об'єкта дослідження та виявлення чинників, що визначають процес;
2. вибір критерію оптимізації, встановлення найбільш значущих факторів і побудова математичної моделі;
3. перевірка адекватності та прогностичної здатності отриманої моделі за допомогою статистичних методів;
4. використання моделі для оптимізації параметрів процесу та прогнозування ефективності роботи системи.

За критерії оптимізації виступає основним показником, за яким оцінюється досліджуваний процес, і водночас є параметром, що зв'язує впливові (значущі) фактори у математичній моделі. При виборі такого критерію важливо, щоб він був комплексною і вичерпною характеристикою процесу.

В якості критеріїв оптимізації обрано продуктивність ППП (за фіксованої повноти поділу) та з урахуванням показників її надійності.

Згідно з апріорною інформацією та попередніми дослідженнями встановлено, що на процес сепарування СЗМ впливають наступні фактори:

- а) кінематичні параметри ППП: амплітуди та частоти коливань, а також кутової швидкості обертання (для циліндричної ППП);
- б) конструктивні параметри ОЕ: кількість, розміри та спосіб розташування;
- в) конструктивні параметри ППП: площа, розміри та кількість отворів;
- г) технологічні параметри та властивості СЗМ: висота шару, щільність, пористість, склад домішкового компоненту, дисперсність компонентів.

Подальший аналіз факторів дозволив зафіксувати деякі з них. Так, з урахуванням робіт [6, 7, 14, 20, 22] та попереднього експериментального підтвердження кінематичні параметри були зафіксовані. Ураховуючи, безпосередній вплив зменшення кількості отворів на продуктивність ППП, а також технологічною необхідністю (для заданих СЗМ) використання розмірів отворів - ці параметрами також були зафіксованими та виключеними з оптимізації. Дослідження показників надійності ППП довели суттєві переваги типу ОЕ з профілем у вигляді напівкола, які були зафіксовані.

Таким чином, оптимізація параметрів відносно критеріїв проведена для наступних факторів: висота ОЕ, коефіцієнт проникності (так званого «живого» перетину) ППП; висота шару СЗМ.

Згідно з матрицею плану експерименту вибиралось одна з комбінацій рівнів факторів, зокрема встановлювали задані ППП. Далі здійснювався запуск сепаратора з заданою подачею СЗМ. Після проходження усієї навіски СЗМ та фіксації витраченого часу визначалась повнота поділу компонентів. У разі не відповідності значень повноти поділу, експеримент повторювали при меншому питомому завантаженні. Таким чином, у всіх комбінаціях факторних рівнів досягали необхідних значень повноти поділу. Після цього для кожного дослідного варіанта обчислювалась значення критерію та будували рівняння регресії.

Підсумкові результати досліджень, рівняння регресії, їхня статистична перевірка та оптимізація процесу сепарування СЗМ на ППП об'ємної структури детально наведені у додатку В.

3.4. Висновки по розділу

1. Розроблена програма експериментальних досліджень передбачає послідовну ідентифікацію динамічних, технологічних і надійнісних показників в залежності від параметрів розроблених ОЕ, забезпечує повний цикл перевірки адекватності створених аналітично-числових моделей.

2. Достовірність та точність експериментальних даних отримана завдяки використанні оригінальних експериментальних стендів плоскорешітного і вібровідцентрового сепараторів, комбінуванні стандартних методик з інноваційними підходами базуючими на високошвидкісній відеозйомці, модальному аналізу із застосуванням сенсорів РСВ та системи Simcenter Testlab 2019.1, високоточному вимірювальному обладнанні.

3. Розроблені адаптовані методики визначення продуктивності, повноти поділу, швидкості руху компонентів та показників надійності ППП доповненні комплексними оціночними показниками (коефіцієнтами), які ураховують форми отворів, параметри об'ємну структуру ППП.

4. Для пошуку оптимальних параметрів ППП використано методи багатofакторного статистичного аналізу та регресійного моделювання, що дозволяють з мінімальною кількістю експериментів отримати статистично достовірну модель процесу сепарування дослідних ППП.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ

Експериментальні дослідження процесу сепарування СЗМ на ППП об'ємної структури проведено відповідно до адаптованих типових методик, згідно програми та розроблених алгоритмів з визначення динамічних показників СЗМ, надійності ППП. Також поставленим завданням було уточнення створених моделей та перевірка їх адекватності.

4.1. Властивості сипких зернових матеріалів

За використанням методик (розділ 3) встановлені властивості дослідних СЗМ (табл.4.1) [194].

Таблиця 4.1 – Властивості СЗМ

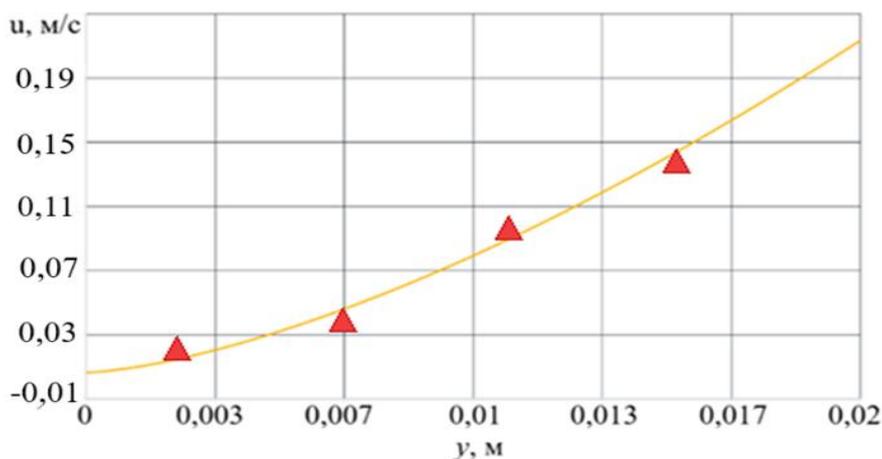
Властивості	Тип СЗМ	
	кукурудза	соняшник
Максимальна товщина шару СЗМ, мм	30	30
Середня щільність СЗМ, кг/м ³	746	395
Коефіцієнт тертя СЗМ по ППП	0.38	0.35
Початковий вміст домішкового компоненту, %	20-22	
Сила тертя СЗМ на ППП, Н	100	67.2
Тиск розподільний на ППП, Па	250	192
Пористість СЗМ, %	42	38

Отримані експериментальні дані (табл.4.1) узгоджуються з відомими даними [22, 23, 70, 197, 198] та є значущими факторами процесу сепарування СЗМ та дозволяють підвищити точність аналітичних та чисельних моделей відповідно до реальних умов.

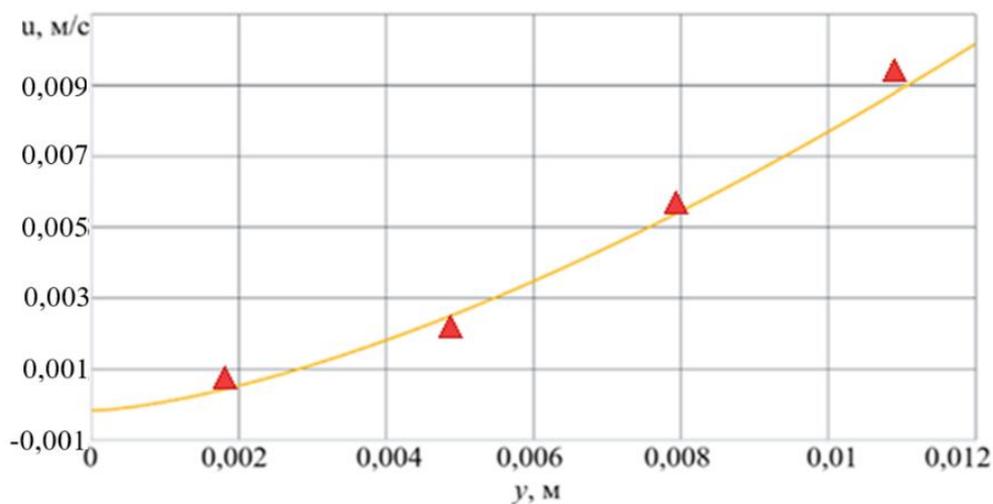
4.2. Закономірності динаміки зернових матеріалів та технологічної ефективності просівальної поверхні

Швидкість руху СЗМ безпосередньо впливає технологічну ефективність процесу сепарування, що відображається у зміні продуктивності обладнання.

Використання швидкісної зйомки з подальшим аналізом зображень (див. методику в розділі 3.3) дозволила отримати середні швидкості руху шару СЗМ на дослідних плоских (рис.4.2, 4.3) та циліндричних (рис.4.4) ППП.



а



б

Рисунок 4.1 – Закономірності зміни швидкості СЗМ кукурудзи (а) та соняшнику (б) за товщиною шару на плоскій ППП об'ємної структури: точки – дані експериментів; крива – дані аналітичні

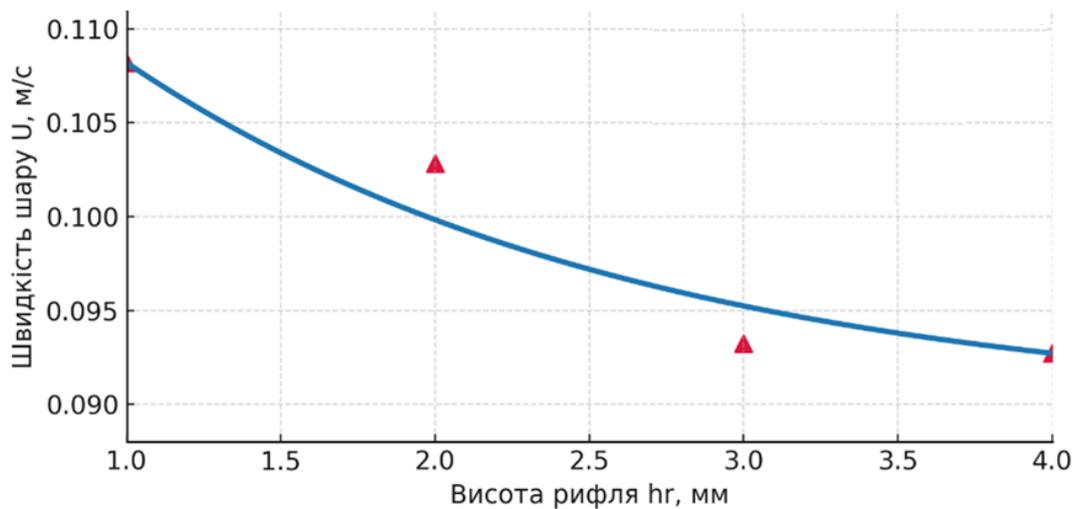
Дослідження проведені для відповідної висоти шару СЗМ, що відповідає попередньому очищенні зернового матеріалу та є вихідною умовою для аналітичних та чисельних моделей.

Отримані експериментальні точки, визначені методом високошвидкісної відеозйомки, характеризують середні швидкості СЗМ в межах обраних підшарів: кукурудза - $y=2,25; 6,75; 11,25; 15,75$ мм, соняшник - $y=1.635; 4.905; 8.175; 11.4$ мм. Порівняння експериментальних даних з аналітичними (рис.2.9) показує відмінності в межах 4,2–4,8%, що пояснюється локальними флуктуаціями швидкості компонентів і впливом граничних умов поблизу ППП. Максимальні розбіжності спостерігаються у верхніх шарах, де СЗМ має більшу рухомість і частотні зіткнення компонентів. Середня відносна похибка даних становить $\delta u = \pm 0,012$ м/с, що підтверджує адекватність аналітичної моделі динаміки СЗМ до експериментальних натурних даних та її придатність для параметричного аналізу.

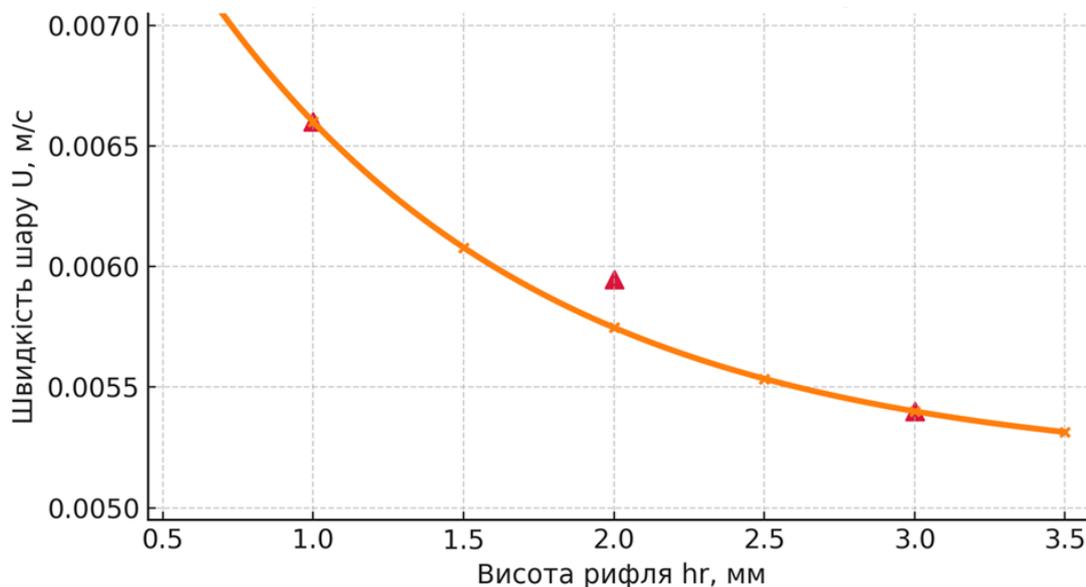
Зміну динаміки СЗМ на ППП об'ємної структури проаналізовано шляхом варіювання висоти ОЕ в значеннях 1, 2, 3 і 4 мм для СЗМ кукурудзи ($h=0,12$ м) та СЗМ соняшнику ($h=0,009$ м) (рис.4.2).

Підвищення висоти ОЕ (в дослідному діапазоні) плоскої ППП призводить до зменшення швидкості руху шару СЗМ (рис.4.2): для кукурудзи з 0.110 м/с до 0.093 м/с – на 15–16 %; для соняшнику з 0.007 м/с до 0.0054 м/с – на 22–23 %. Для циліндричної ППП (рис.4.3) отримано зменшення швидкості руху СЗМ на 5-8% при відповідній зміні висоти ОЕ. Порівняно з плоскою ППП, вплив наявності ОЕ на кінематику шару зменшується, що підтверджує більш сприятливу форму ППП для стабільного руху СЗМ.

Різниця пояснюється властивостями частинок СЗМ: маса, форма, коефіцієнти тертя. Високий коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0.97-0.99$) підтверджує адекватність аналітичних моделей (розділ 2.1) для опису динаміки СЗМ на плоскій та на циліндричній ППП (рис.4.2, 4.3).



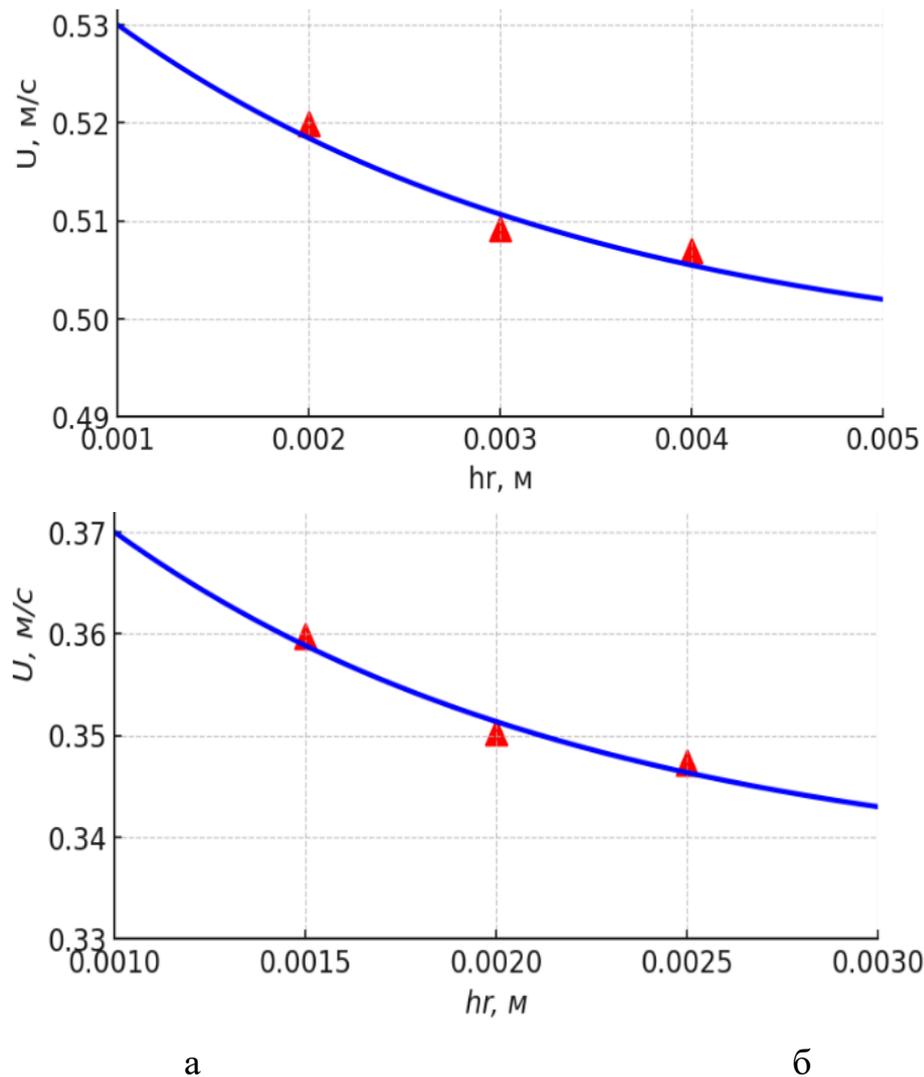
а



б

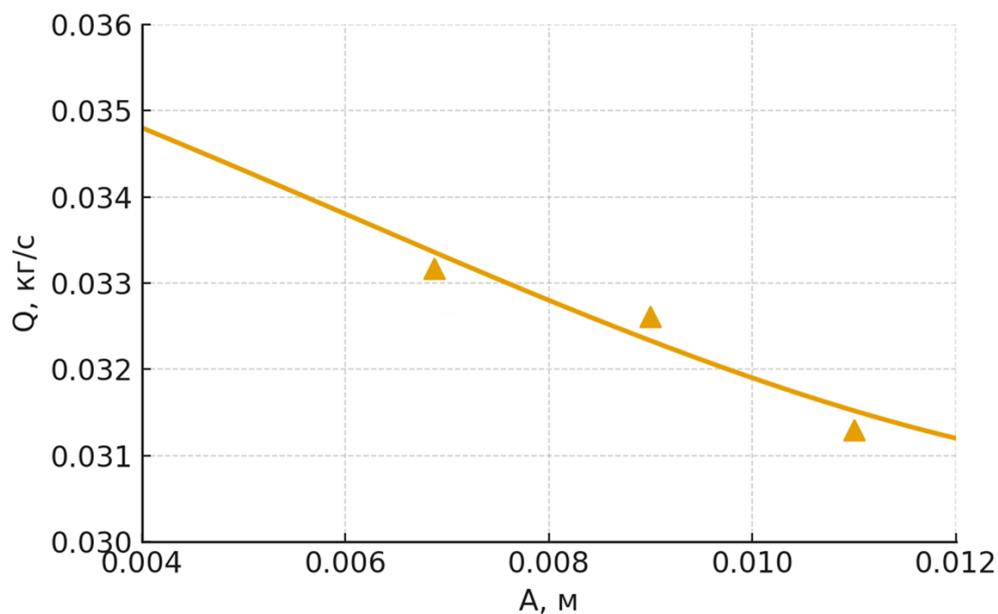
Рисунок 4.2 – Залежності швидкості СЗМ кукурудзи (а) та соняшнику (б) від висоти ОЕ (h_r) плоскої ППП: точки – дані експериментів; крива – дані аналітичні

Аналіз динамічних показників дозволив зосередитися на ОЕ з висотою 0,003м для СЗМ кукурудзи та 0,002м для СЗМ соняшнику. Подальші експериментальні дослідження продуктивності ППП об'ємної структури проведені для СЗМ кукурудзи та соняшнику при різних кінематичних параметрах (методика розділ 3.3).

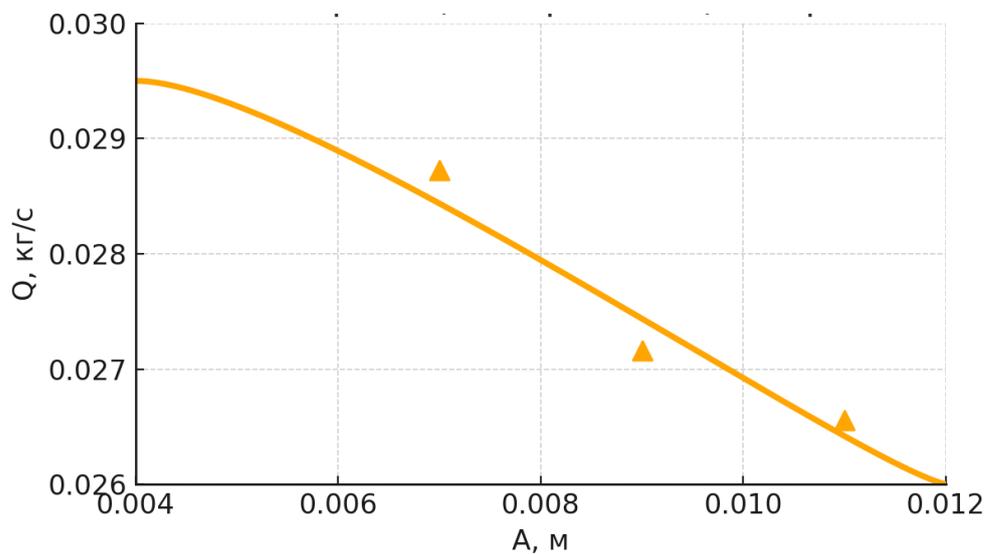


а б
Рисунок 4.3 – Залежності швидкості СЗМ кукурудзи (а) та соняшнику (б) від висоти ОЕ (h_r) циліндричної ППП: точки – дані експериментів; крива – дані аналітичні

У зв'язку з сумісництвом кінематичних параметрів (частоти та амплітуди коливань) між собою (наприклад у вигляді кінематичного коефіцієнту вібрації [20, 35]) приймаємо постійність частоти коливань, а амплітуду змінюємо за допомогою ексцентриків (розділ 3.2).



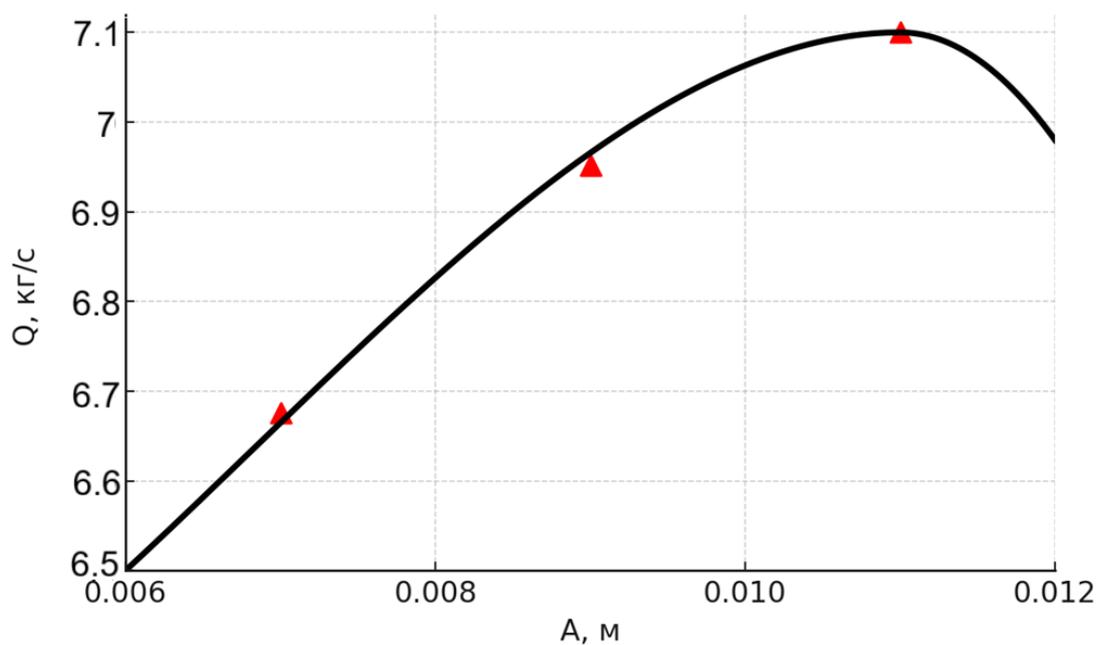
а



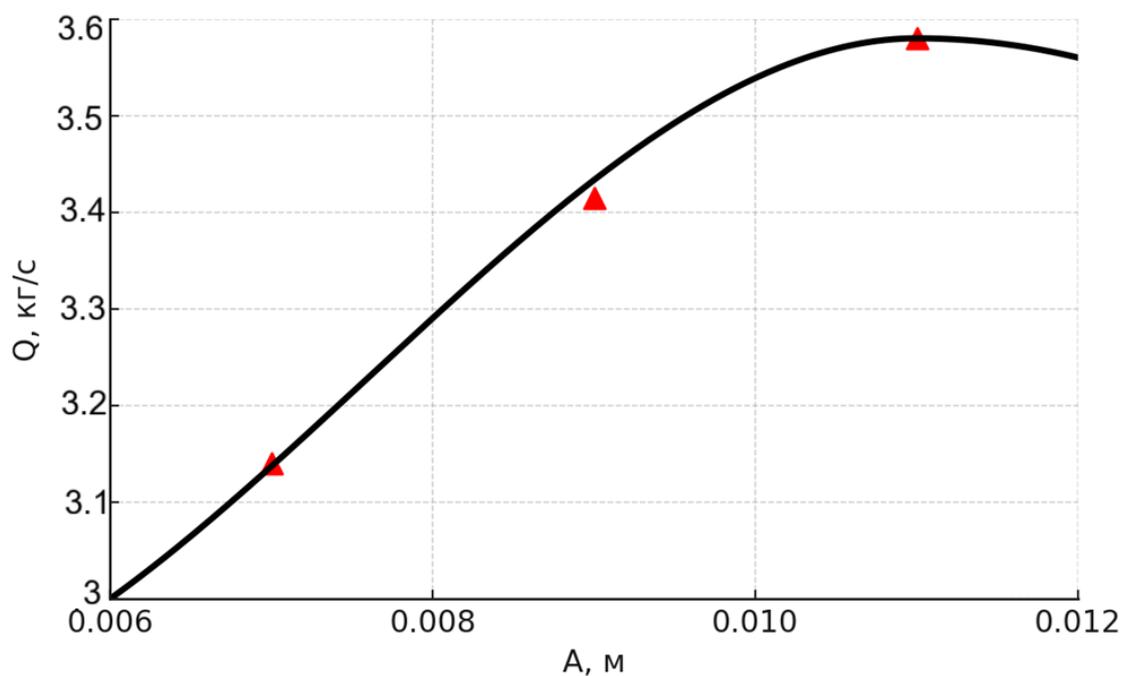
б

Рисунок 4.4 – Залежність продуктивності плоскої ППП від амплітуди її коливань: а – СЗМ кукурудзи; б –СЗМ соняшнику

Із наведених залежностей (рис. 4.4) видно, що збільшення амплітуди коливань плоскої ППП призводить до зменшення її продуктивності: для СЗМ кукурудзи (рис. 4.4 а) з 0,035 кг/с до 0,031 кг/с - на 11–12 %; для СЗМ соняшнику (рис. 4.4 б) з 0,0295 кг/с до 0,026 кг/с до 12 %. Це пояснюється інтенсивним розрихленням шару та зменшенням коефіцієнтів тертя середовища, додатковим орієнтуванням та більшій ймовірності просіювання через отвори.



а



б

Рисунок 4.5 – Залежність продуктивності циліндричної ППП від амплітуди її коливань: 1 –СЗМ кукурудзи; 2 –СЗМ соняшнику

Залежності, наведені на рис. 4.5, демонструють більш виражений характер зміни продуктивності циліндричної ППП залежно від амплітуди її коливань. Для

СЗМ кукурудзи (рис. 4.5, а) збільшення амплітуди коливань супроводжується підвищенням продуктивності з 6,5 до 7,1 кг/с – до 9 %. Проте подальше збільшення амплітуди (до 0,012 м) викликає незначне зниження продуктивності (до 7,0 кг/с), що пов'язано з надмірним розпушенням шару середовища та нерівномірним хаотичним рухом компонентів.

Для СЗМ соняшнику бачимо подібну закономірність (рис. 4.5, б) та зростання продуктивності з 3,0 до 3,6 кг/с, після чого спостерігається незначне зниження до 3,5 кг/с.

Розбіжність між експериментальними та аналітичними даними не перевищує $\pm 3,64$ %, що свідчить про високу узгодженість та адекватність розроблених моделей (розділ 2.1).

4.3. Закономірності зміни показників надійності просіювальної поверхні

Перевірка зношення дослідних ППП, внаслідок абразивної СЗМ, проведено відповідно розробленої методики (п.3.3).

Експериментальне вимірювання зношення ППП протягом його експлуатації дозволило отримати відповідні дані щодо зміни товщини (табл.4.2, рис.4.6) [194]. Виходячи з даних чисельних моделей (розділ 2.2) об'єктом досліджень обрано ППП з рядним розташуванням ОЕ та їх профілем у вигляді напівкола.

Таблиця 4.2 – Експлуатаційне зменшення товщини ППП (Δh , мкм)

Час експлуатації, годин	Базова ППП		Дослідна ППП з ОЕ	
	СЗМ		СЗМ	
	соняшник	кукурудза	соняшник	кукурудза
0	0	0	0	0
2000	30	65	24	41
4000	75	130	61	104
6000	115	195	105	180
8000	170	295	152	245
10000	225	395	199	310

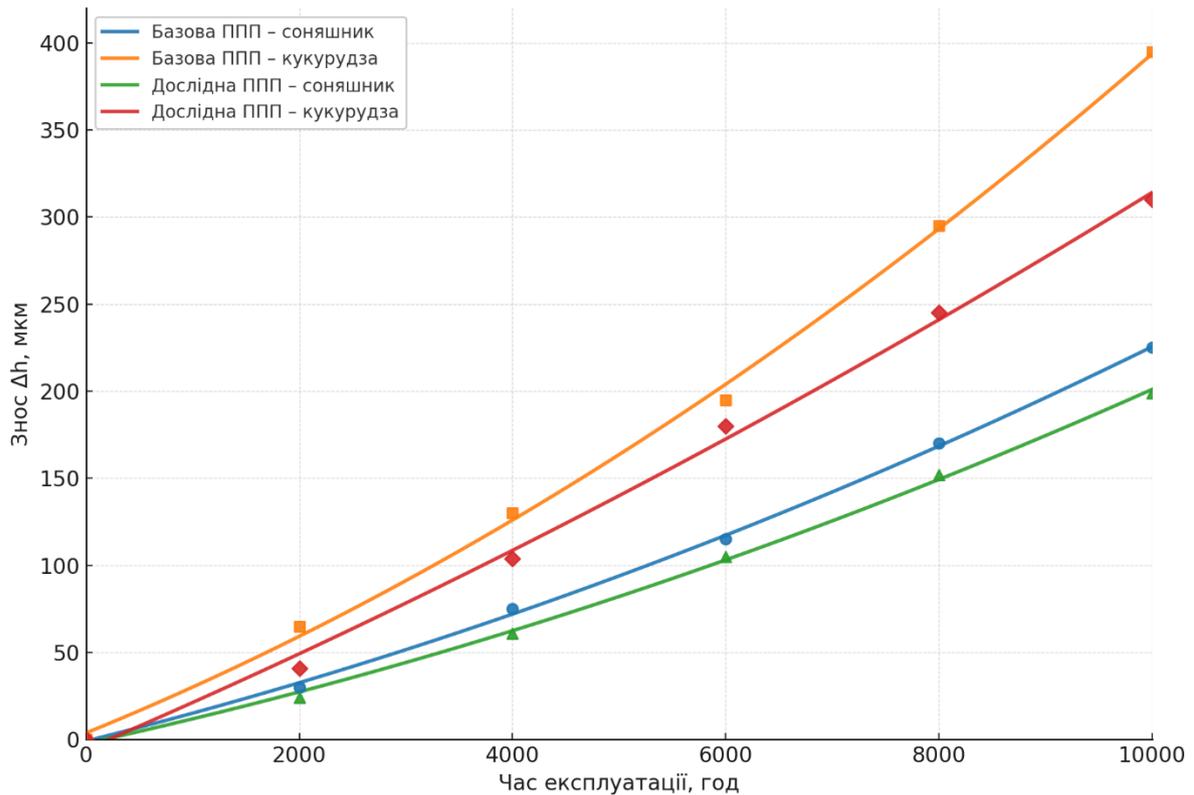


Рисунок 4.6 – Залежність зносу ППП за товщиною протягом строку експлуатації:
 1 – базова ППП при сепаруванні СЗМ кукурудзи; 2 – дослідна ППП з ОЕ при сепаруванні СЗМ кукурудзи; 3 – базова ППП при сепаруванні СЗМ соняшнику; 4 – дослідна ППП з ОЕ при сепаруванні СЗМ соняшнику

Аналіз залежності (табл.4.2, рис.4.6) доводить нелінійний характер, що пояснюється інтенсивним зношенням ППП протягом експлуатації викликаним комплексними діями. Збільшення інтенсивності ґрунтується на утворенні рельєфності та мікротріщин, втоми матеріалу ППП та зменшенню опору стиранню. Також встановлено, що СЗМ кукурудзи викликає найбільший знос і інтенсивне зниження товщини ППП на 55,8-76% по відношенню до СЗМ соняшнику.

Слід відмітити, що в ході експериментів встановлено, що після 9000 годин роботи (особливо при сепаруванні СЗМ кукурудзи) з'являються перші ознаки пластичної деформації. В подальшому це призводить до появи тріщин.

Такі дослідження дозволили аргументувати діапазон варіювання товщин ППП (0,6-1мм) прийнятий раніше для чисельного моделювання (розділ 2.2).

Для аналізу та подальшого практичного використання шляхом апроксимації даних визначені рівняння регресії, які описують процес зношування дослідних ППП об'ємної структури з достатньою точністю:

- для СЗМ соняшнику

$$\Delta h(t) = 6.9196 \times 10^{-7}t^2 + 0.0134t - 2.25$$

$$\text{з коефіцієнтом детермінації } R^2 = 0.998, \quad (4.1)$$

- для СЗМ кукурудзи

$$\Delta h(t) = 5.7143 \times 10^{-7}t^2 + 0.02626t - 5.5714 \quad R^2 = 0.997. \quad (4.2)$$

Діапазон валідності становить $t \in [0, 10\,000]$ годин.

Експлуатація базових ППП після призводила до швидшої появи деформацій у вигляді тріщин між отворами, порівняно з дослідними ППП об'ємної структури. З урахуванням отриманих даних (табл.4.1, 4.2), швидкості руху СЗМ (розділ 4.2) проведемо визначення показників надійності згідно з опрацьованими методиками (розділ 3.3.3). Результати представлені в табл.4.3.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнту зношення ППП (при наробітку 10 тис. годин)

Показники	Базова ППП		Дослідна ППП з ОЕ	
	СЗМ соняшник	СЗМ кукурудза	СЗМ соняшник	СЗМ кукурудза
Швидкість зношування, мкм/год	0,0225	0,0395	0,0199	0,031
Коефіцієнт зношення С	$2,734 \times 10^{-4}$	$3,687 \times 10^{-4}$	$2,418 \times 10^{-4}$	$2,893 \times 10^{-4}$
Граничний ресурс, год	8802	6529	12841	10733

Аналіз даних (табл.4.3) свідчить про відмінність значень показників надійності для базових та дослідних ППП. Підвищення ресурсу дослідної ППП на 45,9% (для СЗМ соняшнику) та на 64,4% (СЗМ кукурудзи) говорить про поліпшення надійності за рахунок конструктивних особливостей ППП, зокрема наявність ОЕ. Різниця показників надійності ППП при сепаруванні СЗМ

кукурудзи та соняшнику (до 16,4-25,8%) пояснюється відмінністю властивостей та потребує обов'язкового урахування при розрахунках інженерних або наукових дослідженнях.

Встановлено, що наявність ОЕ на ППП поліпшує їх ресурс порівняно з базовими ППП, що говорить про підвищення показників надійності. Крім того, зміна властивостей СЗМ також є значущим фактором відносно критерію надійність ППП.

Наступним етапом досліджень показників надійності ППП став модальний аналіз та перевірка на наявність резонансних явищ. Отримані дані чисельної моделі (розділ 2.2) були порівняні з експериментальними даними, які отримані за допомогою методики (розділ 3.3.3) та комплексу Simsenter.

Для експериментів використовували ППП з рядним розташуванням ОЕ у вигляді профілю напівкола. Були виготовлені 3 дослідних ППП в товщині, що імітували процес їх зношення: 1 мм (без експлуатації), 0,8мм та 0,6 мм (зі зносом).

Таблиця 4.4 – Власна частота коливань ППП з рядним розташуванням ОЕ у вигляді напівкола

Мода	Чисельні розрахунки			Експериментальні дані			Відхилення		
	Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм			Товщина пластини s , мм		
	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1
1	47	74,1	81,8	45,5	71,6	79,1	3,2	3,35	3,3
2	80,7	120,9	134,1	77,8	116,9	130,1	3,6	3,34	3,04
3	107,7	158,6	185,7	103,6	151,9	178,1	3,82	4,2	4,1
4	139,5	197,2	221,2	133,5	189,3	211,5	4,3	4,03	4,43

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4.4, показує високий рівень узгодженості між чисельними розрахунками та експериментальними вимірюваннями власних частот коливань ППП з рядним розташуванням ОЕ у вигляді напівкола. Середнє відхилення для першої та другої моди становить

відповідно 3,3–3,5%, що свідчить про достатню точність моделювання у низькочастотному діапазоні. Для третіх та четвертих мод розбіжність зростає до 4,0–4,4%, що є типовим для складніших форм коливань, де зростає вплив крайових умов і дисипативних факторів. Загальне середнє відхилення по всіх модах становить 3,8%, що відповідає рівню похибки, прийнятному для інженерних експериментів і верифікації FEM-моделей.

Отримані результати підтверджують адекватність чисельної моделі та можливість її використання для прогнозування динамічних характеристик перфорованих елементів аналогічної конструкції.

4.4. Результати багатфакторного експерименту

Для оптимізації параметрів використання методика планування багатфакторного експерименту (розділ 3), яка дозволяє отримати раціональні значення факторів дослідного процесу та їх оптимальні співвідношення.

Статистичний аналіз моделі другого порядку для трирівневого плану Бокса-Бенкіна проводився по загальноприйнятим методикам [199, 200].

В результаті моделювання (розділ 2) та проведення попередніх експериментів (розділ 4.2, 4.3) встановлені наступні значущі фактори: висота ОЕ, коефіцієнт проникності ППП, висота шару СЗМ. Дослідження виконані для СЗМ кукурудзи, ППП з шаховим розташуванням ОЕ з профілем у вигляді напівкола.

З метою розширення використання результатів дослідження, можливості їх інтеграції до різних типів СЗМ та ППП, обрані значущі фактори вибрані як відносні значення. Так, висота ОЕ обрана в залежності від товщини b_g проходowego (домішкового) компоненту СЗМ, що визначається виразом:

$$h_r = K_r b_g, \quad (4.3)$$

де K_r – поправочний коефіцієнт, що узгоджує висоту ОЕ в залежності від розмірів компоненту СЗМ.

Для прийнятих умов дослідження обрано наступний діапазон висоти ОЕ: $\frac{1}{4}b_g, \frac{1}{2}b_g, \frac{3}{4}b_g$, що для заданої СЗМ кукурудзи з товщиною компонентів $b_g=4,3\text{мм}$ дорівнює: 1,08 мм; 2,15 мм; 3,23 мм.

Другий значущий фактор - коефіцієнт проникності ППП (ε) є комплексним конструктивним показником ППП, що визначає кількість отворів та одиниці її площі по відношенню до неперфорованої частини

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^{N_h} S_h}{S_{\text{ППП}}} = \frac{\sum_1^{N_h} T_h L_h}{S_{\text{ППП}}}, \quad (4.4)$$

де $S_h, S_{\text{ППП}}$ - площа одного отвору та всієї ППП, відповідно; N_h - кількість отворів на ППП; T_h, L_h - ширина та довжина отвору (рис.4.7)

Даний фактор одночасно враховує розміри отворів (T_h та L_h) та розміри перемичок (крок розташування t_1 та t_2) ППП (рис.4.7).

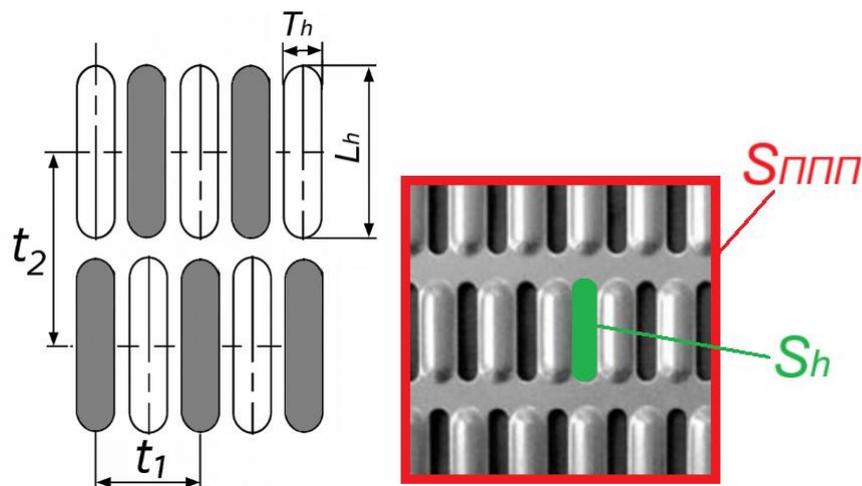


Рисунок 4.7 – Схеми до визначення показника проникності ППП (ε)

Враховуючі технологічні вимоги щодо якості фракції заданого СЗМ обрано ППП з зафіксованими параметрами: $T_h=5\text{мм}$, $L_h=25\text{мм}$, $t_2=30\text{мм}$. Тоді параметр – крок t_1 є змінним фактором в оптимізації.

Для прийнятих умов дослідження обрано наступний діапазон показника проникності ППП (ε): 0,25/0,28/0,31, що для заданої ППП (з іншими зафіксованими параметрами) потребує відповідних кроків розташування $t_1=16\text{мм}/15\text{мм}/14\text{мм}$.

Третім фактором обрано висоту шару СЗМ, який визначає технологічну продуктивність процесу сепарування СЗМ та надійність ППП, за рахунок створення зовнішнього навантаження/абразивного зносу ППП.

Для відносного аналізу прийнято наступне визначення висоти шару СЗМ:

$$h = N_L b_g, \quad (4.5)$$

де N_L – кількість підшарів в шарі СЗМ, приймаємо 3/5/7.

Для прийнятих умов дослідження, обраного СЗМ кукурудзи ($b_g=4,3\text{мм}$), та з урахуванням практик використання сепарувального обладнання приймаємо висоту шару $h=12,9\text{мм} / 21,5\text{мм} / 30,1\text{ мм}$.

Результати проведення дослідів, їх подальша обробка, оптимізація дослідного процесу представлені в додатку В.

В результаті було отримано (див. Додаток В) рівняння регресії процесу сепарування СЗМ на дослідній ППП в розкодованому вигляді (у натуральних змінних):

$$Q(h_r, N_L, \varepsilon) = 0,819751 - 0,333128h_r + 0,009531 N_L - 5,094689\varepsilon + \\ + 0,001984h_r N_L + 0,023000 N_L \varepsilon - 0,313808 h_r^2 + 0,001655 N_L^2 - 8,791111 \varepsilon^2, \quad (4.6)$$

де: h_r – відносна висота ОЕ; N_L – кількість підшарів СЗМ (шт); ε – коефіцієнт проникності ППП.

Перевірку рівнянь регресії (прийнятої гіпотези) на адекватність проводили за допомогою критерію Фішера, розрахукове значення якого ($F_{розр}=0,7$) було менше табличного ($F_{табл}=2,53$) з 95%-вою вірогідністю (Додаток В).

В результаті статистичної обробки даних отримані раціональні діапазони значень факторів: відносної висоти ОЕ $h_r=0,46\dots0,51$; кількості підшарів СЗМ $N_L=4,5\dots5,5$ штук і коефіцієнту проникнення $\varepsilon=0,27\dots0,285$, які забезпечують збільшену продуктивність дослідної ППП в діапазоні $Q=0,03 - 0,039$ кг/с.

4.5. Висновки за розділом

1. Експериментальними дослідженнями динаміки СЗМ за методом високошвидкісної відеозйомки встановлені діапазони швидкості шару СЗМ

кукурудзи/соняшнику на плоских ППП: 0,093...0,110 м/с/ 0,0054...0,0070 м/с. Відносна розбіжність між аналітичними та експериментальними результатами не перевищує 4,8 %, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі динаміки СЗМ. Встановлено, що підвищення висоти ОЕ в дослідному діапазоні (до 4 мм) зменшує швидкість СЗМ до 23 % на плоских ППП і до 8% на циліндричних ППП.

2. Експериментальна перевірка дозволила встановити залежності продуктивності ППП від їх конструктивно-кінематичних параметрів. Для ППП із збільшенням амплітуди коливань в дослідному діапазоні продуктивність зменшується до 12 % з подальшою стабілізацією. Середня відносна розбіжність між результатами не перевищує $\pm 3,6$ %, що також підтверджує узгодженість даних аналітичного моделювання і натурних експериментів.

3. Тривалими експериментальними дослідженнями встановлені граничні ресурси товщини ППП, які визначають надійність, при сепаруванні СЗМ соняшнику та кукурудзи. Встановлено, що дослідні ППП з ОЕ мають підвищений ресурс (до 12 841 год для СЗМ соняшнику і 10 733 год для СЗМ кукурудзи) на 45,9 % і 64,4 % відповідно. Також встановлено, що коефіцієнт зношення зменшився з $(2,734...3,687) \times 10^{-4}$ до $(2,418...2,893) \times 10^{-4}$, а швидкість зношування — на 10–25 %, що підтверджує позитивний вплив конструктиву запропонованого ППП на показники надійності.

4. Експериментальні дослідження динамічних характеристик ППП, їх порівняння з чисельними даними частот коливань показало розбіжність до 4,4 %, що доводить адекватність розроблених чисельних моделей і можливість їх подальшого використання для прогнозування резонансних режимів.

5. Використанням багатофакторної оптимізації процесу сепарування СЗМ за трирівневим планом Бокса–Бенкіна встановлені раціональні значення факторів: відносна висота ОЕ $h_r=0,46...0,51$; кількість підшарів СЗМ $N_L=4,5...5,5$; коефіцієнт проникності $\varepsilon=0,270...0,285$. У цих межах забезпечується максимальна продуктивність ППП об'ємної структури $Q=0,030 - 0,039$ кг/с з перевіркою адекватності за критерієм Фішера (95 % довірчий рівень).

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ПЕРФОРОВАНИХ ПРОСІЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ТА ЇХ ВИРОБНИЧА АПРОБАЦІЯ

Виробничі випробування розроблених ППП об'ємної структури проведені в тривалих умовах експлуатації, що дозволило в повній мірі дослідити та уточнити параметри процесу сепарування СЗМ.

5.1. Виробнича апробація розроблених перфорованих просіювальних поверхонь

5.1.1. Технологічна ефективність процесу сепарування зернових матеріалів.

Випробування розроблених ППП об'ємної структури проведено на базі ТДВ «Племзавод «Михайлівка» (с. Андріївське Сумського району Сумської області), СТОВ «Промінь» Лебединського району Сумської області, протягом 2024 – 2025 рр. При проведенні випробувань проводилось очищення СЗМ кукурудзи та соняшнику, а загальний об'єм обробленого зерна за період випробувань склав: 7700 т. – кукурудзи, 4000 т. – соняшнику.

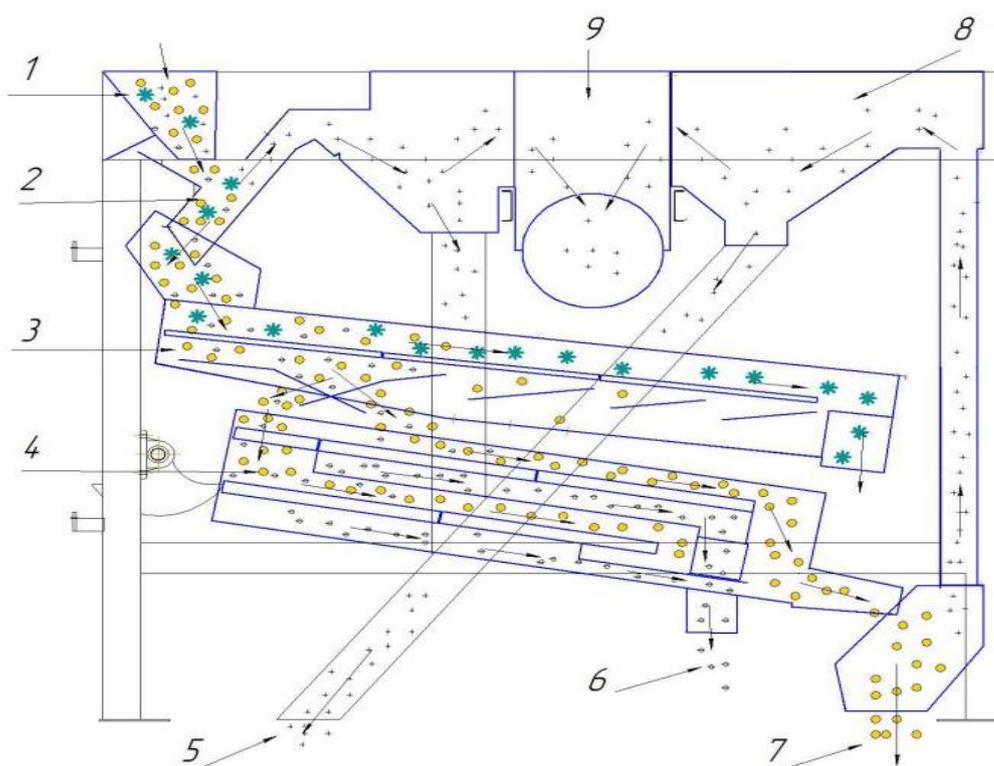
Агропідприємство ТДВ «Племзавод «Михайлівка» засноване у 1998 р та займається скотарством, а також вирощуванням зернових та олійних культур.

Конструктивну схеми та загальний вигляд модернізованих сепараторів Петкус К-527, БСХ-100 представлено на рис.5.1, 5.2, відповідно.

Технологічний процес очистки СЗМ в сепараторі Петкус К-527 (рис.5.1, табл.5.1) відбувається наступним чином. СЗМ вводиться безперервно по трубопроводу до живильника (поз.1), який розподіляє рівномірно по робочій ширині машини. Далі СЗМ попадає до пневмосепарувального каналу (поз.2), де відбувається відділення легких домішкових компонентів за аеродинамічними ознаками поділу.



a)

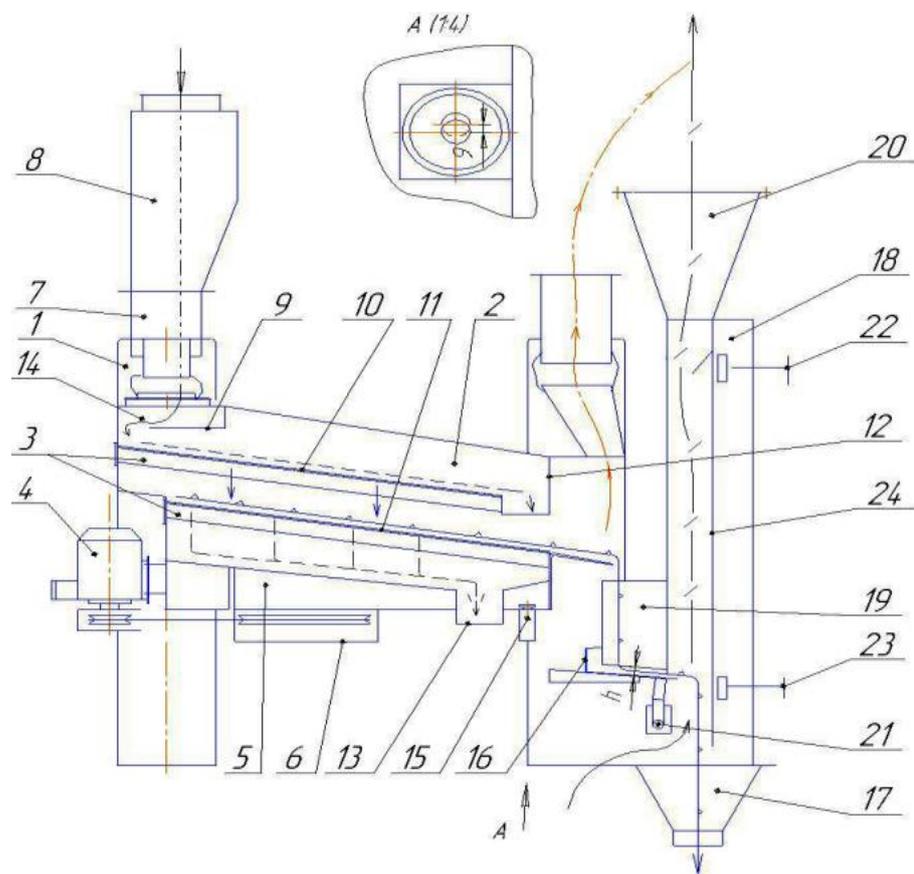


б)

Рисунок 5.1 – Загальний вигляд (а) та схема (б) сепаратора Петкус К-527:
 1 – живильник; 2 – канал пневмосепарувальний; 3, 4 – решетний стан; 5, 6, 7 – лотки для фракцій; 8 – запилений повітряний потік; 9 – очищене повітря



а)



б)

Рисунок 5.2 – Загальний вигляд (а) та схема (б) сепаратора БСХ-100:

1 – станина; 2 – рама; 3 – стан решетний; 4 – привід; 5 – траверса;
 6 – кожух захисний; 7 – патрубок завантажувальний; 8 – розподілювач;
 9 – лоток; 10, 11 – ППП; 12, 13 – лотки домішок; 14 – рух повітряного потоку;
 15 – обмежувач; 16 – лоток; 17 – збірник; 18 – канал пневосепарувальний; 19 –
 патрубок приймальний; 20 – перехідник; 21 – вісь; 22, 23 – рукоятка; 24 – стінка

Подальше сепарування СЗМ за розмірами компонентів відбувається на верхній ППП (поз.3), де відбувається відділення крупних домішок (сходова фракція). Проходова фракція СЗМ попадає на розроблене ППП об'ємної структури. Ця ППП є підсівною та призначена для відділення дрібного домішкового компоненту від основного. Домішки проходять через отвори ППП та направляються до лотку (поз.6). Очищений СЗМ сходом виводиться з машини через лоток (поз.7). Повітряний потік відділяє від СЗМ дрібнодисперсний пил, який осаджується в пилоосаджувальній камері та виводиться через лоток (поз.5).

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики сепаратора Петкус К-527

№	Характеристики	Значення
1	Продуктивність при очистці (СЗМ пшениця), т/год	40
2	Встановлена потужність, кВт	11,1
3	Кут нахилу ППП, градусів	8-12
4	Параметри вібрації ППП: частота, хв ⁻¹ /амплітуда, мм	350/15
5	Витрата повітря, м ³ /с	3
6	Габаритні розміри машини, м	2,94/2,73/2,65
7	Вага, т	2,1

Принцип роботи сепаратора БСХ-100 (рис.5.2, табл.5.2) полягає в наступному. СЗМ що очищується через приймальний патрубок (поз.7) надходить на розподільник (поз.8), звідки з допомогою патрубків розділяється на два потоки і направляється до решетного стану (поз.3). Решетний стан здійснює колові рухи, під впливом яких СЗМ переміщуються по ППП і відбувається процес сепарування. У решетному стані є фартух, який зменшує можливість потрапляння основного компоненту СЗМ у відходи. Крупні домішкові компоненти виводяться з сепаратора через лоток (поз.12), а решта СЗМ з дрібними домішками проходять через сортувальне ППП (поз.10) поступає на нижні ППП (поз.11). Дрібні домішкові компоненти, що просипалися через підсівну ППП, потрапляють на скатну поверхню, а потім через лоток (поз.13) виводяться із машини. Очищений СЗМ від крупних і дрібних домішкових компонентів надходить до пневмосепаруючого каналу (поз.18), де відбувається

відділення легких домішкових компонентів за аеродинамічними властивостями. Повністю очищений СЗМ через нижній збірник (поз.17) виводиться з сепаратора. Повітряний потік направляєтся по повітроводах до циклону для очищення від дрібнодисперсних домішок (пилу).

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики сепаратора БСХ-100

№	Характеристики	Значення
1	Технічна продуктивність (попередня очистка), т/год	80
2	Ефективність очищення від засмічених домішок, %	80
3	Встановлена потужність, кВт	1,5
4	Витрата повітря, м ³ /год	8500
5	Частота кругових коливань решітного кузова, с ⁻¹	6,25
6	Радіус кругових коливань кузова, мм	11±2
7	Габаритні розміри машини (довжина/ ширина/висота), м	2,5/2,5/2,2
8	Площа ППП (підсівних/сортувальних), м ²	6 (3/3)
9	Кількість ППП (підсівних/сортувальних), шт.	8 (4/4)
10	Маса, т	1,583

Для дослідних сепараторів використано наступні ППП:

а) для сепарування СЗМ соняшнику – сортувальна ППП з отворами Ø8 мм, підсівна ППП об'ємної структури з отворами 3×20мм;

б) для сепарування СЗМ кукурудзи – сортувальна ППП з отворами Ø10 мм, підсівна ППП об'ємної структури з отворами 5×20мм;

Для очищення СЗМ, які мають властивості відмінні від СЗМ пшениці, спостерігається зміна (зменшення) продуктивності сепараторів: для СЗМ кукурудзи до 15%; для СЗМ соняшнику - до 50% від номінальної (паспортної).

В залежності від властивостей вихідних СЗМ кукурудзи або соняшнику здійснювали варіювання наступних параметрів:

а) заміна ППП в залежності від типу отворів та типу ОЕ;

б) питома завантаження ППП – положенням заслінки живильників (рис.5.1, поз.1, рис.5.2, поз.7).

Кінематичні параметри (амплітуда та частота коливань) ППП в модернізованих сепараторах не варіювались та були прийняті паспортними.

Загальна потужність встановлених електродвигунів для сепараторів склала: БСХ-100 – 1,5 кВт год, Петкус К-527 – 11,1 кВт·год.

Встановлено, що використання розроблених ППП об'ємної структури підвищує технологічну ефективність процесу сепарування СЗМ у вигляді збільшення продуктивності сепараторів на 20...30%. Якість процесу сепарування СЗМ при випробуваннях аналізували через визначений вміст домішкової фракції відповідно до ДСТУ 4138-2002 «Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості».

Результати виробничих випробувань модернізованих сепараторів з розробленими ППП наведено в табл.5.3. Крім того, на базі ТОВ «Ханзе Агрі» смт. Степанівка Сумська обл. проведені додаткові випробування розроблених ППП об'ємної структури спільно з представниками машинобудівного заводу ПрАТ «Харківпродмаш» (м.Харків).

Таблиця 5.3 – Результати виробничих випробувань модернізованих сепараторів з розробленими ППП об'ємної структури

№	Назва агро-підприємства	Модель сепаратора	СЗМ	Продуктивність модернізованого, т/год	Підвищення продуктивності по відношенню до базової конструкції, %
1	ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с. Андріївське Сумського району Сумської області	Петкус К-527	соняшник	19	20-30
			кукурудза	34	
2	СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області	БСХ-100	соняшник	40	20-25
			кукурудза	72	
3	ТОВ «Ханзе Агрі» смт. Степанівка Сумська обл.	Buhler TAS 206A-5	соняшник	87	24-30
			кукурудза	165	

Спільні випробування проведені на сепараторі Buhler TAS 206A-5 (рис.5.3), а результати представлені в табл.5.3.



Рисунок 5.3 – Виробничі випробування модернізованого сепаратора
Buhler TAS 206A-5

За результатами виробничих випробувань (табл.5.3) за рівних умов встановлено: ефективність процесу сепарування СЗМ кукурудзи та соняшнику розробленими ППП об'ємної структури порівняні з базовими збільшує продуктивність сепараторів на 20...30%; відсутність відмов та технологічних збоїв.

Спільна (з представниками машинобудівного заводу ПрАТ Харківпродмаш) виробнича перевірка модернізованого сепаратору Buhler TAS 206A-5 з розробленими ППП об'ємної структури на ТОВ «Ханзе Агрі» довела підвищення ефективності їх роботи на 24...30%, що склало при сепаруванні СЗМ кукурудзи – 165т/год та соняшнику – 87 т/год.

В результаті тривалої безвідмовної роботи та наявної технологічної ефективності розроблені ППП з обґрунтованими раціональними параметрами впроваджені у серійне виробництво на ПрАТ Харківпродмаш та можуть бути виготовлені під замовлення. Річний економічний ефект на ПрАТ Харківпродмаш

від впровадження результатів роботи у серійне виробництво розроблених ППП складає 126 тис. грн при їх щорічній програмі випуску в 100 штук.

Результати виробничих випробувань підтверджені відповідними актами (Додаток Д).

5.1.2. Надійність перфорованих просіювальних поверхонь.

Виробнича перевірка надійності ППП об'ємної структури була проведена з метою підтвердження результатів чисельного моделювання (розділ 2) і лабораторних експериментальних досліджень (розділ 4) у реальних експлуатаційних умовах. Основним завданням було визначення закономірностей зміни товщини ППП в процесі тривалої роботи, оцінка швидкості зношування, а також ідентифікація моменту появи перших мікротріщин і характеру розвитку втомних пошкоджень. Отримані результати дозволили кількісно оцінити ресурс ППП і уточнити дані моделювання з урахуванням реальних напружено-деформованих станів, що виникають у процесі сепарування СЗМ.

Випробування проведені у двох агрогосподарствах на двох різних сепараторах, що доводить об'єктивність даних. Обидва модернізовані сепаратори працювали з ідентичними технологічними та конструктивно-кінематичними параметрами. На обидва сепаратори встановлювалися дослідні ППП з наступними параметрами: матеріал сталь 08X18H10, товщина початкова 1,0 мм, з ОЕ напівкруглого профілю та шаховим розташуванням.

Перед початком випробувань кожне ППП проходило контроль початкової товщини мікрометром з точністю 2 мкм. Протягом експлуатації проводилися регулярні вимірювання в однакових точках через інтервали 1000, 2000, 4000, 6000, 8000 і 10 000 год роботи. Паралельно здійснювали візуальний контроль поверхні за допомогою оптичного ендоскопа та фіксацію дефектів високороздільною камерою (Canon EOS R10, 26 Мп).

Після 2000 год роботи базові ППП демонстрували початкове зменшення товщини на 30 мкм при сепаруванні СЗМ соняшнику і 65 мкм при роботі з СЗМ кукурудзи, що відповідає середній швидкості зношування 0,015–0,032 мкм/год.

Для ППП об'ємної структури ці значення становили відповідно 24 мкм і 41 мкм, тобто на 20–25 % менше. Після 4000 год експлуатації спостерігалось стабільне наростання зносу — до 75 мкм (СЗМ соняшник) і 130 мкм (СЗМ кукурудза) для базових ППП та 61 мкм і 104 мкм — для експериментальних, що відповідає середньому темпу зношування 0,026–0,033 мкм/год. У цей період вплив властивостей СЗМ проявився найчіткіше: компоненти СЗМ кукурудзи через більшу твердість і нерівномірність поверхні спричиняли підвищене абразивне навантаження.

Після 6000–8000 год роботи для обох типів ППП виявлено нелінійне збільшення швидкості деградації металу, що пояснюється розвитком мікрорельєфу, зародженням поверхневих тріщин і втомних деформацій. Для базових ППП знос становив 115–170 мкм (СЗМ соняшнику) і 195–295 мкм (СЗМ кукурудзи), для дослідних — 105–152 мкм і 180–245 мкм відповідно. Середня швидкість зношування при цьому підвищилася на 40–60 % відносно початкових періодів експлуатації. Мікрофотографічний аналіз (збільшення $\times 500$) виявив утворення мікротріщин довжиною до 0,3 мм поблизу отворів на базових ППП уже після 9000 год роботи. Для експериментальних ППП перші мікродефекти з'явилися пізніше — на 10 000 год, коли середня товщина зменшилася до 0,74–0,78 мм.

Встановлено, що момент появи тріщин безпосередньо корелює з мінімальною допустимою товщиною, визначеною аналітичним шляхом (розділ 2.2). Для СЗМ кукурудзи критичне значення $h_{\min}=0,77\text{--}0,92$ мм, для СЗМ соняшнику – $h_{\min}=0,60\text{--}0,73$ мм; саме ці межі відповідають початку втомних пошкоджень у виробничих умовах. Фіксація тріщин відбувалася переважно у напрямку між отворами, де спостерігається максимальна концентрація напружень. Розвиток дефектів носив локальний характер і не супроводжувався негайним руйнуванням, однак після 10 500 год кількість мікротріщин зростала лавиноподібно, що вказує на втрату пластичності матеріалу.

Ідентифікація швидкості зношування проводилася шляхом апроксимації даних випробувань степенною функцією виду

$$\Delta h = at^b, \quad (5.1)$$

де a — коефіцієнт інтенсивності, b — показник нелінійності, t — час експлуатації. Для кукурудзи отримано $a = 2,2 \times 10^{-2}$, $b = 0,83$, для СЗМ соняшнику $a = 1,8 \times 10^{-2}$, $b = 0,79$, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,992-0,995$. Середня швидкість зношування при $t = 10\ 000$ год становила 0,031 мкм/год для СЗМ кукурудзи й 0,020 мкм/год для СЗМ соняшнику, що узгоджується з лабораторними результатами (розділ 4.3) із відхиленням не більше 5 %.

У результаті промислових випробувань підтверджено, що ППП об'ємної структури демонструють підвищений граничний ресурс роботи: 10 733 год при сепаруванні СЗМ кукурудзи та 12 841 год при сепаруванні СЗМ соняшнику. Для базових ППП ці показники становили відповідно 6529 та 8802 год. Таким чином, підвищення ресурсу склало 64,4 % і 45,9 %, що повністю узгоджується з аналітичними прогнозами розділу 2 та експериментальною перевіркою розділу 4. Виявлено, що основним фактором підвищення довговічності є наявність ОЕ, які зменшують контактний тиск та рівномірніше розподіляють абразивне навантаження в зоні дії ЗСМ.

Після завершення випробувань усі ППП були демонтовані для детального фрактографічного аналізу. Мікроструктурне дослідження поверхонь показало, що у зонах початку руйнування спостерігається типова для втомних процесів морфологія: зародження тріщин у приповерхневому шарі, їх злиття та подальше поширення вздовж напрямку найбільшого зсуву. Для дослідних ППП довжина кінцевих тріщин не перевищувала 0,6 мм, тоді як для базових вона досягала 1,2 мм, що свідчить про нижчу інтенсивність розвитку пошкоджень у випадку застосування ОЕ.

Узагальнення результатів виробничої перевірки (табл.5.4) підтверджує адекватність чисельних і аналітичних моделей, розроблених у попередніх розділах.

Фактичні швидкості зношування та моменти появи перших тріщин повністю збігаються з прогнозованими за МКЕ розрахунками і критерієм втомної міцності Гудмана.

Таблиця 5.4 – Усереднені результати виробничої перевірки надійності
ППП по двох агропідприємствах

Показники	СЗМ	
	кукурудза	соняшник
Початкова товщина, мм	1,01 ± 0,002	1,02 ± 0,002
Середня швидкість зношування, мкм/год	0,031	0,020
Сумарне зменшення товщини, мкм	310	199
Момент появи перших тріщин, год	10 000 ± 300	11 200 ± 250
Товщина в момент появи тріщин, мм	0,76 ± 0,01	0,78 ± 0,01
Критичне значення товщини (h_{min}), мм	0,77–0,92	0,60–0,73
Загальний ресурс до граничного стану, год	10 733	12 841
Приріст ресурсу відносно базових решіт, %	+64,2	+45,8

Різниця між модельними й натурними даними не перевищує $\pm 5\%$, що для тривалих випробувань є високим рівнем відповідності. Отримані результати доводять, що застосування ОЕ на ППП дозволяє не лише підвищити технологічну ефективність сепарації, але й істотно збільшити довговічність конструкцій за рахунок зменшення зношування, стабілізації напруженого стану та відтермінування моменту втомного руйнування.

5.1.3. Енергоємність і металоємність процесу сепарування зернових матеріалів.

Потужність, яка витрачається сепараторами доцільно поділити на наступні складові: витрати потужності, які виникають при відсутності СЗМ (холостий хід); витрати потужності, які виникають при робочому режимі решетного блоку з базовими конструкціями ППП; витрати потужності, які виникають при робочому режимі решетного блоку з розробленими ППП. Вимірювання потужності проводили кліщами марки Ц 4505 з наступними характеристиками: межі вимірювань 1...10 кВт, час вимірювання 3,5 с, частота 50 Гц і граничною похибкою 2,5%. Кліщі призначені для короткочасного вимірювання струму без розриву мережі.

Результати вимірювань і розрахунків представлені в табл.5.5.

Таблиця 5.5 – Питомі показники процесу сепарування СЗМ

Тип СЗМ	Тип ППП	Продуктивність сепаратора, т/год	Питомі показники	
			Металоємність, кг/(т·год)	Енергоємність, кВт·год/т
ТДВ «Племзавод «Михайлівка» (Петкус К-527)				
кукурудза	Базова	31	67,7	0,36
	Розроблена об'ємної структури	34	61,8	0,32
соняшник	Базова	15,5	135,5	0,72
	Розроблена об'ємної структури	19	110,5	0,58
СТОВ «Промінь» (БСХ-100)				
кукурудза	Базова	57	27,8	0,026
	Розроблена об'ємної структури	72	21,9	0,021
соняшник	Базова	33	47,9	0,045
	Розроблена об'ємної структури	40	39,6	0,0375

З аналізу даних (табл.5.5) встановлено, що за рахунок підвищення технологічної ефективності маємо зменшення витрат енергії на процес сепарування СЗМ розробленими ППП порівняно з базовими конструкціями на 11,1- 19,4%. Так для сепаратору Петкус К-527 енергоємність зменшилася на 11,1-19,4% до 0,32-0,58 кВт·год/т, а для сепаратору БСХ-100 на 16,6 - 19,2% до 0,021-0,0375 кВт·год/т.

Подібні зміни також характерні відносно витрат металу на забезпечення процесу сепарування СЗМ при використанні розроблених ППП, що становить на 8,7-21,2%. Так для сепаратору Петкус К-527 металоємність зменшилася на 8,7-18,4% до 61,8-110,5 кг/(т·год), а для сепаратору БСХ-100 на 17,3-21,2% до 21,9-39,6 кг/(т·год).

5.2. Ефективність від використання розроблених ППП і впровадження їх у серійне виробництво

Розрахунок економічної ефективності від використання на виробництві та

впровадження розроблених ППП на машинобудівному заводі ПрАТ «Харківпродмаш» проведено за виразами [15, 48, 201, 202]:

$$E_m = \left[E_1 \frac{Q_2 P_1 + E_H}{Q_1 P_2 + E_H} + \frac{(J'_1 - J'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H} - E_2 \right] A_p, \quad (5.2)$$

де $E_{1,2} = C + E_H K_y$ – приведені витрати на виготовлення ППП, відповідно, базових і розроблених; C – балансова вартість ППП; $E_H = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності; $K_y = \frac{C}{A_p} K$ – питомі капіталовкладення на виготовлення ППП; A_p – річний об'єм виробництва ППП; $\frac{Q_2}{Q_1}$ – коефіцієнт урахування росту виробництва; $\frac{(P_1 + E_H)}{(P_2 + E_H)}$ – коефіцієнт урахування зміни строку експлуатації; $P_{1,2}$ – долі відрахувань від балансової вартості на повне відновлення; $K'_{1,2}$ – питомі капіталовкладення за варіантами; $J'_{1,2} = Z_p + Z_e + Z_A + Z_r$ – експлуатаційні витрати:

де Z_p – заробітна плата оператора:

$$Z_p = \frac{z K_p}{Q K}, \quad (5.3)$$

де z – тарифна година ставка; $K_p = 1$ – кількість робітників; Q – продуктивність сепаратора; K – коефіцієнт використання змінного часу; Z_e – витрати на електроенергію:

$$Z_e = \frac{N_e C_e}{Q_{cm} k_1 k_2}, \quad (5.4)$$

де N_e – встановлена потужність електроприводу, кВт; $C_e = 6,9$ грн – вартість 1 кВт/година електроенергії; Q_{cm} – зміна продуктивність, шт/зм; $k_1 = 0,86$; $k_2 = 0,97$ – ККД, відповідно, електродвигунів і мережі; Z_A – витрати на амортизацію:

$$Z_A = \frac{CA}{100 Q K \Gamma_z}, \quad (5.5)$$

де $A = 15\%$ – норма амортизаційних відрахувань на реновацію; Γ_z – річне завантаження, годин; Z_r – витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування:

$$Z_r = \frac{CB}{100 Q K \Gamma_z}, \quad (5.6)$$

де $B = 7\%$ – норма річних відрахувань на ремонт і обслуговування.

Техніко-економічні показники впровадження розроблених ППП в серійне виробництво представлені в табл.5.6.

Таблиця 5.6 – Техніко-економічні показники використання ППП

Найменування показників	Базова ППП*	Розроблена ППП*
Продуктивність, кг/с	4,31/8,61	5,28/9,44
Витрати на електроенергію, грн/т	4,97/2,48	4/2,21
Експлуатаційні витрати, грн/т	6,78/11,48	5,58/9,21
Річний економічний ефект на сепаратор Петкус К-527 на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с. Андріївське Сумського району Сумської області, тис.грн	-	7,5/86,1
Додатковий річний ефект на сепаратор БСХ-100 на СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області, тис.грн	-	108,5
Річний економічний ефект від серійного виробництва ППП на ПрАТ «Харківпродмаш» (при програмі 100 шт./рік), тис.грн	-	126

* – в чисельнику дані до СЗМ соняшнику, а в знаменнику – до СЗМ кукурудзи

Отриманий річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень підтверджено відповідними актами (Додаток Д).

5.3. Висновки за розділом

1. На підставі результатів проведених досліджень розроблені, виготовлені та досліджені у виробничих умовах ППП об'ємної структури, а їх тривала безвідмовна експлуатація підтвердила високу технологічну ефективність та надійність.

2. За результатами виробничої експлуатації на двох агропідприємствах встановлено:

– продуктивність сепараторів Петкус К-527/БСХ-100 підвищилась на 20...30 % і склала: 19 /40 т/год при очищенні СЗМ соняшнику; 34/72 т/год при очищенні СЗМ кукурудзи.

– зниження швидкості зношування на 20–35% і відтермінування появи перших тріщин на 800–1200 год забезпечують приріст ресурсу до 64,2% (при СЗМ кукурудзи) та до 45,8% (при СЗМ соняшнику) порівняно з базовими ППП;

– питомі енерго- та металоємності модернізованих були знижені на 11,1—19,4% / 8,7-21,2%, відповідно.

3. Річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів з ППП об'ємної структури за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав: на СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області – 108,5 тис.грн, на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області – 93,6 тис.грн.

4. Розроблені ППП об'ємної структури впроваджені з 2024 р. в серійне виробництво на машинобудівному заводі ПрАТ «Харківпродмаш» (м. Харків) з річним економічним ефектом 126 тис.грн при річній програмі випуску 100 штук.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукового завдання інтенсифікації процесу сепарування СЗМ, яке ґрунтується на аналітичному моделюванні динаміки СЗМ та чисельному КЕ-моделюванні надійності ППП, експериментальній ідентифікації та дозволяє визначати закономірності, розробити кінцеві вирази і методи оптимізації параметрів ППП об'ємної структури, впровадити їх у серійне виробництво.

Основні наукові й прикладні результати досліджень:

1. На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень щодо збільшення технологічної ефективності та надійності сепарувального обладнання встановлено, що існуючі ППП не задовольняють зростаючі вимоги виробництва. Для цього запропоновано використати розроблені ППП об'ємної структури, які складаються з отворів та об'ємних елементів розташованих між ними, забезпечують інтенсивне просіювання компонентів СЗМ та поліпшують жорсткість конструкції. Виконання науково-технічного завдання з обґрунтування параметрів ППП потребує теоретичного та експериментального опрацювання, проведення оптимізації за критеріями продуктивність та надійність.

2. За допомогою розробленої гідродинамічної модель руху СЗМ, в якій ураховано псевдозрідження шару, «сухо-фрикційну» складову зсувних напружень, що дало змогу отримати узагальнені рівняння швидкості СЗМ та продуктивності плоских/циліндричних ППП об'ємної структури. Кількісна ідентифікація структурного ефекту ОЕ, врахування конструктивних та кінематичних параметрів ППП дозволила отримати: поля швидкості СЗМ кукурудзи/соняшнику - 0,47–0,61 м/с / 0,34–0,69 м/с, продуктивність ППП до 7,92 кг/с / до 4,41 кг/с. Вперше виявлено вплив типу профілю (трикутний, напівколо та прямокутний) та параметрів ОЕ на динамічні показники СЗМ, який запропоновано оцінювати через узагальнений коефіцієнт K_v .

3. Проведення числового стимуляційного моделювання дозволило провести КЕ-аналіз напружено-деформованого стану ППП об'ємної структури з варіацією її товщини, типу профілю та параметрів ОЕ, завантаженням шаром СЗМ. Досліджено показники надійності ППП через ідентифікацію напружень, частот власних коливань та витривалість конструкції. Встановлено, що зменшення товщини ППП (внаслідок абразивного зношення) підвищує пікові напруження в центральних та периферійних зонах, тоді як використання певних профілів (напівколо) здатне компенсувати та екстенсифікувати (до 31%) подібний ріст. Визначено мінімальні допустимі параметри, які гарантують витривалість і нерезонансність конструкції ППП.

4. Втомна перевірка надійності ППП з ОЕ полягала в комплексному використанні методу Гудмана та DAF із прив'язкою до власних частот коливань поверхонь. Встановлені граничні значення товщин ППП $h_{\min}=0,60-0,92$ мм, що забезпечують цільовий рівень $\sigma_{\max} \leq 0,6 \sigma_{\text{eff}}$ для ППП з рядним/шаховим розташуванням ОЕ та навантаженням СЗМ. Для практичного використання запроваджено та облічені поправочні коефіцієнти частот $K_{p\omega}$, що дозволяють перераховувати власні частот коливань від базових суцільних пластин до ППП з різними типами ОЕ та схемами їх розташування.

5. Для перевірки аналітичних та чисельних моделей, уточненню діапазонів варіювання параметрів створено комплексну експериментальну методику для ідентифікації динамічних, технологічних і ресурсних параметрів процесу сепарування СЗМ, яка базується на оригінальних розроблених лабораторних установках та високоточному вимірювальному обладнанні: високошвидкісної відеозйомка, модальному аналізу із застосуванням сенсорів РСВ та системи Simcenter Testlab 2019.1. Розроблені адаптовані методики визначення продуктивності, повноти поділу, швидкості руху компонентів та показників надійності ППП доповненні комплексними оціночними показниками (коефіцієнтами), які ураховують форми отворів, параметри об'ємну структуру ППП.

6. Експериментальними дослідженнями динаміки СЗМ за методом

високошвидкісної відеозйомки встановлені діапазони швидкості шару СЗМ кукурудзи/соняшнику на плоских ППП: 0,093...0,110 м/с/ 0,0054...0,0070 м/с. Встановлено, що підвищення висоти ОЕ в дослідному діапазоні (до 4 мм) зменшує швидкість СЗМ до 23 % на плоских ППП і до 8% на циліндричних ППП. Відносна розбіжність між аналітичними та експериментальними результатами не перевищує 4,8 %, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі динаміки СЗМ. Встановлені залежності продуктивності ППП від їх конструктивно-кінематичних параметрів відповідають даним аналітичних моделей з розбіжністю 3,6%. Тривалими експериментальними дослідженнями встановлено, що розроблені ППП з ОЕ мають підвищений ресурс до 64,4 % порівняно з базовими ППП, що підтверджує позитивний вплив конструктиву на показники надійності. Результати досліджень довели, що використання ППП об'ємної структури забезпечує комплексне підвищення продуктивності процесу сепарування СЗМ та поліпшення надійності.

7. В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу сепарування СМЗ за трирівневим планом Бокса–Бенкіна рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів плоскої ППП об'ємної структури: відносна висота ОЕ $h_r=0,46...0,51$; кількість підшарів СЗМ $N_L=4,5...5,5$; коефіцієнт проникності $\varepsilon=0,270...0,285$. Встановлено, що за визначеними параметрами максимальна продуктивність ППП становить $Q=0,030 - 0,039$ кг/с з перевіркою адекватності за критерієм Фішера (95 % довірчий рівень).

8. За результатами досліджень розроблено нормативно-технічну документацію на ППП об'ємної структури, яка впроваджена та використовується в серійному виробництві на ПрАТ «Харківпродмаш» (м.Харків) з річним економічним ефектом 126 тис.грн при річній програмі випуску 100 штук. Виробничими випробуваннями сепарувального обладнання модернізованого ППП об'ємної структури встановлено, що ефективність процесу сепарування СЗМ кукурудзи/соняшника підвищується на 20...30%, а довговічність ППП збільшується на 45-64%. Визначено, що інтенсифікація

процесу сепарування СЗМ, за рахунок використання розроблених ППП об'ємної структури, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 11,1-19,4 % та 8,7-21,2 %, відповідно. Загальний щорічний економічний ефект від застосування модернізованих сепараторів у виробничих умовах СТОВ «Промінь» Лебединського р-ну Сумської області та на ТДВ «Племзавод «Михайлівка» с.Андріївське Сумського району Сумської області склав 203,1 тис. грн.

Список використаних джерел

1. Akhmadiev, F. G., & Gizzajatov, R. F. (2013). Separation processes of granular materials by sizes at the sieve classifiers. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 7, 56–63.
2. Liu, K. (2009). Some factors affecting sieving performance and efficiency. *Powder Technology*, 193(2), 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.027>.
3. Pruteanu, M. A., Ungureanu, N., Vlăduț, V., Matache, M.-G., & Nițu, M. (2023). Contributions to the optimization of the medicinal plant sorting process into size classes. *Agriculture*, 13(3), 645. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030645>.
4. Solding, M. (1999). Interrelation of stratification and passage in the screening process. *Minerals Engineering*, 12(5), 497–516. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00033-3).
5. Заїка П. М., Мазоренко Д. І., Бакум М. В. До 50-річчя науково-дослідної лабораторії вібраційних насіннеочисних машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2012. Вип. 124. Т. 1. С. 153–163.
6. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Харків: Око, 2006. Т. 3, розд. 7. 407 с.
7. Тіщенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 2004. 40 с.
8. Тіщенко Л. Інтенсифікація сепарування зерна: монографія. Харків: Основа, 2004. 224 с.
9. Тіщенко Л. М., Ольшанський В. П., Ольшанський С. В. Гідродинаміка сепарування зерна. Харків: Міськдрук, 2010. 174 с.
10. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Gadzalo, I., Ivanovs, S., Stepanenko, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Y. (2021). Theoretical study of vibrocentrifugal separation of grain mixtures on a sieveless seed-cleaning machine. *Rural Sustainability Research*, 46(341), 116–124. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>.

11. Котов Б. І. Основні напрями розвитку техніки та технології післязбиральної обробки зерна. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. Глеваха, 1997. С. 39–40.

12. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2003. Вип. 33. С. 53–59.

13. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2004. №3 (35). С. 61–63.

14. Kharchenko, S. O. (2017). *Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators*. Kharkiv: Disa+. 220 p.

15. Харченко С. О. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 2018. 40 с.

16. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M., Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 128(1), 34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>.

17. Шейченко В. О., Анеляк М. М., Толстушко М. М., Кузьмич А. Я., Кустов С. О. Обґрунтування сепаруючої поверхні решіт зернозбиральних комбайнів. *Вісник Луцького національного технічного університету. Серія: Сільськогосподарські машини*. 2013. № 26. С. 151–156.

18. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В. О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): монографія. Ніжин, 2017. 552 с.

19. Stepanenko, S. P., & Kotov, V. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 10(4), 137–143.

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

21. Ольшанський В. П., Ольшанський О. В. *Континуальні моделі зернопотоків по віброрешетах: наукова монографія*. Харків: Міськдрук, 2017. 223 с.

22. Алієв Е. Б. *Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія*. Запоріжжя: Статус, 2019. 196 с.

23. Алієв Е. Б. *Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11*. Харків, 2020. 530 с.

24. Кюрчев С. В. *Механіко-технологічне обґрунтування післязбиральної обробки та зберігання насіння зернових і олійних культур: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ» НААН України, 2019. 372 с.

25. Цуркан О. В. *Вібромеханічна інтенсифікація сушіння насіння баштанних культур у процесі післязбиральної обробки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11*. Глеваха, 2020. 499 с.

26. Михайлов Є. В. *Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України: монографія*. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2012. 260 с.

27. Mykhailov, Ye., Gołębiewski, J., Kiurchev, S., Hutsol, T., Kolodii, O., Nurek, T., Głowacki, S., Zadosna, N., Verkholtantseva, V., Palianychka, N., & Kucher, O. (2020). *Economic and technical efficiency of sunflower seed processing* (Monograph). Warszawa. 158 p.

28. Бакум М. В., Абдуєв М. М., Манчинський Ю. О., Сичов В. В., Леонов В. П. *Теоретичні дослідження характеристик руху частинок у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епюри швидкості повітря по висоті*

каналу. *Механізація сільського господарства: Вісник ХДТУСГ*. 2003. Вип. 21. С. 88–94

29. Бакум М. В., Абдуєв М. М., Манчинський Ю. О. Розділення зернових сумішей у нахиленому повітряному каналі. *Праці Таврійської державної аграрної академії*. 2005. Вип. 28. С. 14–22.

30. Vasytkovskyi, O., Vasytkovska, K., Moroz, S., Sviren, M., & Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57(1), 63–70.

31. Сало В. М., Мороз С. М., Васильковський О. М. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Т.1: Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора: монографія. Кіровоград: Лисенко В. Ф., 2014. 108 с.

32. Бредихін В. В. та ін. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: монографія. Харків: Діса+, 2023. 408 с.

33. Bredykhin, V., Shchur, T., Kis-Korkishchenko, L., Denisenko, S., Ivashchenko, S., Marczuk, A., Dzhidzhora, O., & Kubon, M. (2024). Determination of ways of improving the process of separation of seed materials on the working surface of the pneumatic sorting table. *Agricultural Engineering*, 28(1), 51–70.

34. Пивень М. В. Efficiency of separation of grain mixtures by flat vibrating sieves with openers. *Інженерія природокористування*. 2017. № 2(8). С. 38–44.

35. Пивень М. В. Обґрунтування параметрів процесу решітного сепарування зернових сумішей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків, 2006. 20 с.

36. Rhodes, M. (2008). *Introduction to particle technology* (2nd ed.). John Wiley & Sons. (ISBN 9780470011714).

37. Gray, J. M. N. T., & Thornton, A. R. (2005). A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461(2057), 1447–1473. <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1420>.

38. McGlinchey, D. (Ed.). (2005). *Characterisation of bulk solids*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781444305456>.

39. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Кропивницький: Центральноукраїнський національний технічний університет, 2023. 50 с.

40. Котов Б. І., Пастушенко М. Г. Експериментальна оцінка процесу вібровідцентрового очищення зерна ступінчастоконічним решетом. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2005. Вип. 35. С. 205–208.

41. Котов Б. І., Пастушенко М. Г., Степаненко С. П. Дослідження ефективності вібровідцентрової сепарації зерна на ступінчасто-конічному решеті методом планування експериментів. *Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42, ч. 2. С. 70–75.

42. Кобець А. С., Чурсінов Ю. О., Черних С. А., Сабадаш М. П., Грекова Н. В., Канунніков В. П. Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2013. 766 с.

43. Хомик Н. І., Олексюк В. П., Цьонь О. П. Механізація переробки та зберігання сільськогосподарської продукції. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2016. 288 с.

44. Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>

45. Yuan, J. B., Wang, J. F., Li, H., Qi, X. D., Wang, Y. J., & Li, C. (2022). Optimization of the cylindrical sieves for separating threshed rice mixture using EDEM. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(2), 236–247.

46. Stepanenko, S., et al. (2024). Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(8), 160–163. <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33>.

47. Bridgwater, J. (1976). Fundamental powder mixing mechanisms. *Powder Technology*, 15(2), 215–236. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80051-4).

48. Борщ Ю. П. Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневмосепарувального каналу зернових сепараторів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків: ХНТУСГ, 2019. 208 с.

49. Завгородній О. І. Наукові основи процесів очистки отворів решет зерноочисних машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 2001. 304 с.

50. Schmidt, P., Körber, R., & Coppers, M. (2003). *Sieben und Siebmaschinen: Grundlagen und Anwendung*. Wiley-VCH. ISBN 9783527302063.

51. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., & Kotliarevskiy, I. (2024). Determination of hole blocking conditions for perforated sifting surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(5), 342–360. <https://doi.org/10.12913/22998624/190483>.

52. Болтанска Н. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів сепаруючих поверхонь жалюзійних решіт зернозбиральних комбайнів. *MOTROL*. 2011. 13В. С.111–116.

53. Кузьмич А. Я. Дослідження процесу сепарації дрібного зерносоломистого вороху та обґрунтування параметрів робочих органів очисток комбайнів: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2003. 18 с.

54. Lawinska, K., & Modrzewski, R. (2016). *Screening and screening machines considering sieve holes blocking* (Monograph). Institute of Leather Industry. (ISBN 978-83-909348-8-4).

55. Xu, Z., Li, Y., Wan, L., Ma, X., Song, J., & Huang, J. (2023). Optimising the design of ball racks to improve the sorting efficiency of vibrating screen seed cleaners using discrete element method modelling and experiment. *Biosystems Engineering*, 225, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.12.006>.

56. Lawinska, K., & Modrzewski, R. (2017). Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(2), 812–828.

57. Modrzewski, R. (2020). *Przesiewacze sitowe materiałów uziarnionych* (Monografie PŁ, Nr 2339). Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. <https://doi.org/10.34658/9788366287723>.

58. Olshanskiy, S., Slipchenko, M., Kharchenko, S., & Polievoda, Y. (2021). An approximate method for calculating grain flow in a vertical cylindrical vibrosieve. *Vibrations in Engineering and Technology*, 57–65. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-6>.
59. Бакум М.В., Кречот, М.М. [та ін]. Вплив кривизни решета на ефективність сортування насіння соняшника. *Вісник ХНТУСГ*. 2019. 198 (3). С.6-11.
60. Лузан П.Г., Лузан О.Р., Петренко Д.І. Обґрунтування параметрів решета для сепарації зерна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. Вип.29. С.46-53.
61. Решето для очистки зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. 133625 Україна: МПК В07В 1/46. № u2018 12181; заявл. 10.12.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.
62. Тікунов С.Р., Бредихін В.В., Сметанкіна Н.В. Класифікація решіт з отворами у формі овалу Кассіні. *REICST*, 2022. С.110–113.
63. Singh, R. (2004). Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders. *Filtration & Separation*, 41(1), 20–24. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(04\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00107-7).
64. Тищенко Л., Мазоренко Д., Пивень М., Харченко С., [та ін.]. Моделювання процесів зернових сепараторів: монографія. Харьков: Міськдрук, 2010. 360 с.
65. Решето: пат. 82093 У Україна: МПК В07В 1/00. № u 2012 14385; заявл.17.12.12; опубл. 25.07.2013, Бюл.№14.
66. Li, Z., Hu, Y., Jia, P., Si, Q., & Tong, X. (2021). Study on screening performance and parameters optimization of double relatively independent vibrating screen. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(6), 156-168. <https://doi.org/10.37190/ppmp/143161>.
67. Mellmann, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders – Forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, 118(3), 251–270. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00402-2).

68. Lanzinger, C., & Schmitz, H. (1996). *Sieve for harvesting machines* (U.S. Patent No. US5588912A). United States Patent and Trademark Office.

69. Циліндричне решето: пат. України № 200708038; МПК В07В 1/28; № 35148; заявл. 16.07.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17.

70. Абдусєва Ф. М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка решіт для вібровідцентрового сепарування насіння кукурудзи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків, 2010. 20 с.

71. Сито для просіювання сипких матеріалів : пат. України на корисну модель № 74218; МПК В07В 1/00; № u201108765; заявл. 12.07.2011; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

72. Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann. (ISBN 978-0080970530).

73. Решето з прямокутними отворами, що самоочищається: пат. 68034 U Україна: МПК В02С 4/00, В07В1/00. № u 2011 10727; заявл.06.09.11; опубл. 12.03.2012, Бюл.№5.

74. Решето з прямокутними отворами: пат. 55286 U Україна: МПК В07В 1/00, А01В 76/00. № u 2010 06635; заявл.31.05.10; опубл. 10.12.2010, Бюл.№23.

75. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах: пат. 50874 U Україна: МПК В07В 1/00. № u 2009 13683; заявл. 28.12.09; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

76. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штампованих решетах: пат. 58042 U Україна: МПК В07В 1/28. № u 2010 11203; заявл. 20.09.10; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.

77. Sosnowski, W. (2022). *Sieve device for fine cleaning of grainy material* (U.S. Patent No. US11325158B2). United States Patent and Trademark Office.

78. Ольховський В., Дударєв І. Моделювання руху конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу. *Сільськогосподарські машини*. 2021. 46. С.70-84. <https://doi.org/10.36910/acm.vi46.494>.

79. Мороз С.М., Васильковський М.І., Васильковський О.М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Техніка в сільськогосподарському*

виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. 2004. Вип. 14. С. 72-78.

80. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Мороз С.М., Нестеренко О.В. Попередні дослідження пасивного струнного решета. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. Вип. 52. С.73-80. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.

81. Спосіб сепарації насінневих сумішей на перфорованих робочих поверхнях: пат. 62953 У Україна: МПК В07В 1/00. № и 2011 01339; заявл.07.02.11; опубл. 26.09.2011, Бюл.№18.

82. Котов Б. І. Вібропневматичне розділення насінневих сумішей. *Вісник агротехнічної науки*. 2004. №5. С. 25–27.

83. Walton, O., Dreyer, C., & Riedel, E. (2013). *Centrifugal size-separation sieve for granular materials* (U.S. Patent Application Publication No. US20130270158A1). U.S. Patent and Trademark Office.

84. Циліндричне решето: пат. України на корисну модель № 47805; № u200908824; заявл. 25.08.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 4.

85. Yuan, J., Li, H., Qi, X., Hu, T., Bai, M., & Wang, Y. (2020). Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14, 871–881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>.

86. Конусне решето: пат. України на корисну модель № 84553; № u201304946; заявл. 17.04.2013; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.

87. Nenciu, F., Mircea, C., Vladut, V., Belc, N., & Lavinia, M. (2021). Evaluation of wheat seed separation performances for new design of rotating cylindrical sieve, equipped with customizable homogenization coil. *Proceedings of ERDev. 2021*. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF316>.

88. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of built-in separators of mass-exchange columns (Survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, 57, 522–528. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00969-y>.

89. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П., Зінчук В.С. До обґрунтування раціональної конструкції вібровідцентрових решіт. *Праці ТДАТУ*. 2010. Вип.10. Т.5. С. 151-156.
90. Makse, H. A., Havlin, S., King, P. R., & Stanley, H. E. (1997). Spontaneous stratification in granular mixtures. *Nature*, 386, 379–382.
91. Brilliantov, N. V., & Pöschel, T. (2004). *Kinetic theory of granular gases*. Oxford University Press. doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198530381.001.0001.
92. Trumic, M., & Magdalinovic, N. (2011). New model of screening kinetics. *Minerals Engineering*, 24(1), 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.013>.
93. Tishchenko, L. N., Ol'shanskii, V. P., & Ol'shanskii, S. V. (2011). On velocity profiles of an inhomogeneous vibrofluidized grain bed on a shaker. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84, 509–514. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0498-4>.
94. Kharchenko, S. O., Kharchenko, F. M., Stelmakh, A. M., Pogulyai, V. M., Mayorov, O. V., Guz, O. I. (2024). Analysis of perforated sifting surfaces of separation equipment and prospects for their development. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (57)), 56-63. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.8>.
95. Решето: пат. КМ 159886 Україна: МПК В07В 1/28. № у 2024 05513; заявл. 21.11.24; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29.
96. Профільоване решето: пат.КМ 160024 Україна: МПК В07В 1/28. № у 2024 06046; заявл. 18.12.24; опубл. 30.07.2025, Бюл. № 31.
97. Харченко С., Харченко Ф., Стельмах А. Фактори ефективності решетного сепарування сипких середовищ. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С.212.
98. Харченко С., Харченко Ф., Заровний Р. Корегування технологічної продуктивності зерно- та насіннеочисних машин. *Матеріали III Міжнародної*

науково-практичної Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика». Кропивницький: Академія Прикладних наук. 2022. С.32-34.

99. СОУ 74.3-37-147:2004. Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисні сушильні комплекси. Методи випробувань. Київ. 2006. 64 с.

100. ISO 3310-1:2016. (2016). *Test sieves – Technical requirements and testing – Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. International Organization for Standardization.

101. Shchur, T., Bredykhin, V., Tikhonov, S., Makarenko, O., Mezentsev, V., Kruszelnicka, W. (2024). Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with Cassini oval shape openings. *Journal of Agricultural Engineering*, 5(62), 666-673.

102. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V., & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7), 63–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920>.

103. Морозовська З.А. Основні види пошкоджень деталей решітних зернодробарок. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2014. Вип. 196, ч. I. С. 283–286.

104. Федченко З. А. Обґрунтування параметрів сепаруючих решіт молоткових зернових дробарок: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2017. 182 с.

105. Подпряттов Г.І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. К. : НАУ, 2000. 126 с.

106. Дацишин О.В., та ін. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв. Вінниця: Нова Книга, 2009. 488 с.

107. Kharchenko, S., Samborski, S., Kloda, L. et al. (2025). Combined method of identification of free oscillations of perforated riffled plates. *Scientific Reports*, 15, 23992. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06614-5>.

108. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Paśnik J. (2023). Numerical study of the natural oscillations of perforated vibrating surfaces with holes of complex geometry. *ASTRJ*, 17(6), 73–87.
109. Kharchenko, S. et al. (2022). Influence of physical and constructive parameters on durability of sieves of grain cleaning machines. *ASTRJ*, 16, 156–165. <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>.
110. Гарт Е.Л., Терьохін Б.І. Концентрація напружень в однорідній пластині з круговим отвором, підкріпленням включенням із функціонально-градієнтного матеріалу. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ITMM'2021*. 2021. 110–115. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.0138>.
111. Nedderman, R. M. (1992). *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press, 352p.
112. Andreotti, B., Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2013). *Granular media: between fluid and solid*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521197953.
113. Blekhman, I. I. (2000). *Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications*. World Scientific, Singapore.
114. Ristow, G. H. (2000). *Pattern Formation in Granular Materials*. Springer, Berlin. 173 p. ISBN 978-3-540-67286-2.
115. Duran, J. (2000). *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials*. Springer, New York. 214 p.
116. Romyantsev, A. S. (1990). *Vibratory Conveying and Processing*. Hemisphere Publishing, New York.
117. Hirota, K. (1998). *Theory of Vibratory Transport*. Springer, Berlin.
118. Burdin, M., Panov, E., & Samarin, A. (2020). Mathematical modeling of particle motion on a vibrating sieve surface. *E3S Web of Conferences*, 175, 05004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505004>.
119. Czubak, A., & Michalczyk, J. (2001). *Teoria transportu wibracyjnego*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
120. Dong, K., Wang, B., & Yu, A. (2013). Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: From discrete particle simulation to process

performance prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(33), 11333–11343. DOI: 10.1021/ie3034637.

121. Król, R. (2012). Screening on a screen with a vibrating sieve. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48(2), 513–524.

122. Harzanagh, A. A., Orhan, E. C., & Ergun, S. L. (2018). Discrete element modelling of vibrating screens. *Minerals Engineering*, 121, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.010>.

123. Ogunmodimu, O. O. S., Mainza, A. N., Govender, I., & Franzidis, J.-P. (2025). Granular flow dynamics on vibrating screens: A mechanistic study. *Minerals Engineering*, 228, 109337. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109337>.

124. Goodman, M. A., & Cowan, S. R. (1971). Two problems in the gravity flow of granular materials. *Journal of Fluid Mechanics*, 45(2), 321–339. <https://doi.org/10.1017/S0022112071000030>.

125. Campbell, C. S. (2006). Granular material flows – An overview. *Powder Technology*, 162(3), 208–229. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.008>.

126. Goldhirsch, I. (2003). Rapid granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 267–293. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161114>.

127. Garzó V., Dufty J. W. (1999). *Kinetic Theory for Granular Flows*. Springer. ISBN: 978-0387987946.

128. Півень, М. В. (2021). Дослідження пористості сипкої суміші. У *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ»*. Інноваційні розробки в аграрній сфері (Т. 2, 17–18 травня 2021 р., с. 448–449). Харків: ХНТУСГ.

129. Ольшанський В. П., Ольшанський О. В. Математичні моделі зернопотоків по віброрешетах. Харків: Міськдрук. 2016. 140 с.

130. Piven, M. (2016). Equation of the planned flow of granular grain mixture. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 16(4), 63–72.

131. Piven, M. (2016). Planned Motion Equations of Free-running Grain Mixture Flow. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 16(4), 63–72.

132. Savage S.B. (1983) Granular flows down rough inclines. Review and extension. *Mechanics of granular materials*, 261-282.

133. Ольшанський, В.П., Бурлака, В.В., Сліпченко, М.В., Харченко, С.О. Про нелінійну модель руху зерноsumіші змінної пористості по плоскому віброрешету. *Вісник СНАУ. Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. 10/1 (29). С. 107 -112.

134. Ольшанський В.П., Ольшанський О.В. Про квадратичну апроксимацію розподілу питомої маси в шарі вібросепарованої зерноsumіші. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2016. №2 (2). С. 66-70.

135. Ольшанський В.П., Ольшанський С.В., Любін М.В. Апроксимація розподілу пористості в шарі зерноsumіші на плоскому віброрешеті. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2016. 2(82). С. 94-99.

136. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., Kharchenko, F.M., Kharchenko, S.A. (2014). *Design of dynamics of grain mixture at a separation on the riffled sieve of vibroseparator. Engineering of nature management, № 2 (2), 54-60.*

137. Харченко С.О., Борщ Ю.П., Абдуєв М.М. Ефективність розшарування зернових сумішей при їх очищенні в пневмосепарувальних каналах зернових сепараторів. *Загальнодержавний міжвідомчий збірник: Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 47 (1). С. 253-260.

138. Bredykhin, V., Shchur, T., et all. (2024). Determination of ways of improving the process of separation of seed materials on the working surface of the pneumatic sorting table. *Agricultural Engineering*, 28 (1), 51-71.

139. Bakum, M., Kharchenko, S., Kovalyshyn, S., Krekot, M., Kharchenko, F., Shvets, O., Kielbasa, P., Miernik, A. (2022). Identification of parameters of the separation process of safflower seed material on sieves. *Journal of Physics: Conference Series*, 2408, 012013 IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2408/1/012013>.

140. Hou, J., Liu, X., Zhu, H., Ma, Z., Tang, Z., Yu, Y., Jin, J., Wang, W. (2023). Design and motion process of air-Sieve castor cleaning device based on discrete element method. *Agriculture*, 13, 1130. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061130>.
141. Jesny, S, Prasobh, G.R. (2022). A Review on Size Separation. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*, 7 (2), 286-296. <https://doi.org/10.35629/7781-0702286296>.
142. Honghai Liu, Jie Jia, Nieyangzi Liu, Xiaojin Hu, Xiong Zhou. (2018). Effect of material feed rate on sieving performance of vibrating screen for batch mixing equipment. *Powder Technology*, Vol.338, 898-904. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.046>.
143. Tishchenko, L. (2001). Hydrodynamic characteristics of fluidised bulk solids at vibrocentrifugal separation at grain processing enterprises. *Modern directions of technology and mechanisation of processes of processing and food production: Bulletin of KhNTUA*, 5, 13–33.
144. Krzysiak, Z., Samociuk, W., Zarajczyk, J., Kaliniewicz, Z., Pieniak, D., Bogucki, M. (2020). Analysis of the Sieve Unit Inclination Angle in the Cleaning Process of oat grain in a rotary cleaning device. *Processes*, 8, 346. <https://doi.org/10.3390/pr8030346>.
145. Piven M. (2015). Justification of grain mixture separation process by flat vibrating sieves. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 17 (7), 163–169.
146. Lukyanenko, V. (2015). Choice of continuum dynamics model to describe vibration separation processes of seed mixtures. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 17 (7), 3–10.
147. Giani, S., Hakula, H. (2023). Free vibration of perforated cylindrical shells of revolution: Asymptotics and effective material parameters. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 403 (A), 115700. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115700>.
148. Kalamkarov, A., Andrianov, I., Weichert, D. (2012). Asymptotic analysis of perforated shallow shells. *Internat. J. Engrg. Sci.*, 53, 1-18.

149. Tishchenko, L. (2000). To determination of hydrodynamic characteristics of fluidized bulk solids during operation of vibrocentrifugal separators. *Ecology and agricultural machinery. Collection of scientific works*, T.1, 70–73.
150. Tishchenko, L. (2003). Determination of dynamic characteristics of the cylindrical screen blade on the basis of finite-element models. *Scientific articles of NAU*, 60, 315–323.
151. Tishchenko, L., Abdueva, F., Olshansky, V. (2008). Comparison of two methods of determining the coefficient of viscosity of the freeze-dried grain mixture at vibration-centre separation. *Vibrations in technology and engineering*, 1(50), 96–100.
152. Kharchenko, S., Kovalyshyn, S., Zavgorodniy, A., Kharchenko, F., Mikhaylov, Y. (2019). Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 58 (2), 17–26. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-02>.
153. Manoach, E., Warminski, J., Mitura A. et al. (2013). Dynamics of a laminated composite beam with delamination and inclusions. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 222, 1649–1664. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01952-6>.
154. Samborski, S., Korzec, I. (2023). Application of the Acoustic Emission Technique for Damage Identification in the Fiber Reinforced Polymer Composites. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 17(1), 210-221. <https://doi.org/10.12913/22998624/156602>.
155. Ciecieląg, K., Kęcik, K., Skoczylas, A., Matuszak, J., Korzec, I., Zaleski, R. (2022). Non-destructive detection of real defects in polymercomposites by ultrasonic testing and recurrence analysis. *Materials*, 15(20), 7335.
156. Voloshin, M. (1995). On analogies in the kinematic modes of flat and centrifugal-vibrating sieves of grain machines. *Mechanization and electrification of agriculture*, 81, 37-40.
157. Senjanović, I., Hadžić, N., Vladimir, N. (2017). Vibration analysis of thin circular plates with multiple openings by the assumed mode method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(1), 70–85.

158. Dinkar, M.K. (2015). *Vibration Analysis of Perforated Plates*. Ph.D thesis, Birla Institute of Technology and Science, Pilani.
159. Folias, E.S., Wang, J.J. (1990). On the 3-dimensional stress field around a circular holes in a plate of arbitrary thickness. *Comput Mech*, 6 (3), 379-391.
160. Chai, B.G. (1996). Free vibration of laminated plates with a central circular hole. *Compos Struct*, 35, 357-368.
161. Saraçoğlu, M. H., Uslu, F., & Albayrak, U. (2020). Stress and displacement analysis of perforated circular plates. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 6(3), 150–159. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2020.03.006>.
162. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., Mitura, A., Paśnik, J., Korzec, I. (2023). Identification of the natural frequencies of oscillations of perforated vibrosurfaces with holes of complex geometry. *Materials*, 16, 5735. <https://doi.org/10.3390/ma16175735>.
163. Civalek, Ö., Çatal, H. (2003). Linear static and vibration analysis of circular and annular plates by the harmonic differential quadrature (HDQ) method. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, XVII(1), 43–71.
164. Lee, W.M., & Chen, J.T. (2011). Free vibration analysis of a circular plate with multiple circular holes by using indirect BIEM and addition theorem. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 78(1), 0110151–510.
165. Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells*. New York: McGraw-Hill, 591 p.
166. Atanasiu, C., & Sorohan, Ş. (2016). Displacements and stresses in bending of circular perforated plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 147, 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/147/1/012095>.
167. Jafari, A., & Saljooghi Nezhad, V. (2016). Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology*, 297, 126-143. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.008>.

168. Azelmad, E., Salmi, A., Kennassi, E., & Bousshine, L. (2018). Elastoplastic behavior analysis of clamped circular perforated thin plates. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 15(2), 23–37.

169. Konieczny, M. M., Achtelik, H., & Gasiak, G. (2020). Finite element and experimental stress analysis in circular perforated plates loaded with concentrated force. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(51), 164–173. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.13>.

170. Achtelik, H., Gasiak, G., & Grzelak, J. (2008). Strength tests of axially symmetric perforated plates for chemical reactors: Part II—Experiments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4), 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.09.001>.

171. Saraçoğlu, M.H., Uslu, F., & Albayrak, U. (2021). Investigation of hole shape effect on static analysis of perforated plates with staggered holes. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, 3(2), 133–44. <https://doi.org/10.47933/ijeir.883510>.

172. Huang, M., & Sakiyama, T. (1999). Free vibration analysis of rectangular plates with variously shaped holes. *Journal of Sound and Vibration*, 226(4), 769–786. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2326>.

173. Boyko, A.I., Fedchenko, Z.A. (2017). Analysis of work conditions and causes wear holes separating sieves in service. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(48), 34-40.

174. Keen, B.A., & Haines, W.B. (1923). On the effect of wear on small mesh wire sieves. *The Journal of Agricultural Science*, 13(4), 467-482. <https://doi.org/10.1017/S0021859600003865>.

175. Varga, M., Widder, L., Griesinger, M., Adam, K., & Badisch, E. (2016). Wear progress and mechanisms in high temperature sieves. *Engineering Failure Analysis*, 61, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.032>.

176. Kharchenko, S., Samborski, S., Paśnik, J., & Kharchenko, F. (2025). The natural oscillations of perforated sifting surfaces with epicycloidal holes. *Advances in*

Science and Technology Research Journal, 19(1), 256-268.
<https://doi.org/10.12913/22998624/195463>.

177. Odman, S.T.A. (1955). *Studies of boundary value problems. part II. Characteristic functions of rectangular plates*. Stockholm: Swedish Institute for Cement and Concrete Research.

178. Dowling, N. E., Kampe, S. L., & Kral, M. V. (2019). *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue (5th ed.)*. Pearson. ISBN 978-0-13-460654-5.

179. Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2011). *Mechanical engineering design (9th ed.)*. McGraw-Hill.

180. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal fatigue in engineering (2nd ed.)*. Wiley.

181. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Підручник дослідника. Харків: Мачулін, 2016. 204 с.

182. Лежнюк П.Д., Матвійчук В.А., Рубаненко О.Є. Технології наукових досліджень. Вінниця: ВНАУ, 2015. 186с.

183. Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М. Методи наукових досліджень. Х.: НТУ "ХП", 2009. 142 с.

184. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статистична обробка даних. К.: НАУ. Книжкове видавництво, 2008. 308 с.

185. Лугінін О.Е., Білоусова С.В. Статистика. К.: Центр навчальної літератури, 2005. 580 с.

186. ДСТУ 4138:2002. Методи визначення якості насіння сільськогосподарських культур. К.: Держстандарт, 2003. 173 с.

187. ДСТУ ISO 7970:2011. Зернові культури. Визначення домішок. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012.

188. ДСТУ ISO 658:2006. Насіння олійних культур. Метод визначення вмісту домішок. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2006. 13 с.

189. International Seed Testing Association. *International Rules for Seed Testing*. Bassersdorf (Switzerland), ISTA, 2023.

190. Стельмах А.М., Рябка Д.О., Харченко С.О. (2024). Методика та результати поділу насінневих сумішей за розмірами. *Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції* (21-23 жовтня 2024 р.). Ч.1. Суми: СНАУ. С.137.

191. Харченко Ф.М., Котляревський І.В., Стельмах А.М. (2023). Аналіз методів ідентифікації властивостей компонентів зернових сумішей при їх подальшому сепаруванні. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції* (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.). Полтава: ПДАУ. С.210-213.

192. Kharchenko, S., Bilovod, O., Lytvynenko, V., Kelemesh, A., & Tarasenko, D. (2024). Modeling the loading process of pneumatic separation channels. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(80)), 16–24. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.320265>.

193. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., Korzec-Strzałka, I., Stelmakh, A. (2024). Dynamics of loose materials and oscillations of cylindrical perforated sifting surfaces with volumetric riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8), 238-255. <https://doi.org/10.12913/22998624/194114>.

194. Харченко С.О., Біловод О.І., Харченко Ф.М., Стельмах А.М., Тіманов В.В., Чигрин А.І. Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: наук. зб.* Кропивницький: ЦНТУ, 2025. Вип. 12(43), ч. 1. С. 265-271.

195. Ventsel, E., Krauthammer, T. (2001). *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications*. New York: Marcel Dekker. 651 p.

196. Канарчук В.Є., та ін. Надійність машин. К.: Либідь, 2003. 424 с.

197. Voća, S., Pliestić, S., Dobricevic, N.,a & Filipovic, D. (2008). Physical and mechanical properties of sunflower seed. *Cereal Research Communications*, 36, 471-474.

198. Emmanuel Baidhe, Clairmont L. Clementson, Juan M. Osorno & Carlos Urrea. (2024). Use of thermophysical properties to characterize cooking trends of slow- and regular-darkening pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *CyTA - Journal of Food*, 22, 1.
199. Chen, S., An, S.G., Kan, Z., Huang, L.D., Meng, H.W., Qi, J.T., & Peng, H. (2024). Design and optimization of an airflow-vibration sieving device for the effective cleaning of *Cyperus esculentus* L. harvesting mixture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 17(4), 77–88. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241704.8359>.
200. Wei, W. B., Li J.C., Hao, J. J., Xiao, M. H., & Zhang, H. J. (2024). Multiparameter collaborative optimization of the vibrating screen based on the behavior of oil sunflower seed penetrating screen holes. *Int J Agric & Biol Eng*, 17(1), 49-58. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241701.8111>.
201. Pukhovskiy, Ye. S., Frolov, V. K., Prykhodko, V. P., & Betsko, Yu. M. (2023). Джерела економічної ефективності гнучкого автоматизованого виробництва. *Технічна інженерія*, 1(91), 77–83. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-77-83](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-77-83).
202. Orlov, V. M., Holovenko, S. I., Korsikova, N. O., & Zablotska, N. O. (2023). Формування цінової політики та стратегії ціноутворення: економічна сутність і роль у функціонуванні підприємства. *Transformational Economics and Law*, 2(7), 17–28.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Stelmakh A. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(8):238-255. doi:10.12913/22998624/194114.

2. Kharchenko, S.O., Kharchenko, F.M., Stelmakh, A.M., Pogulyai, V.M., Mayorov, O.V., Guz, O.I. (2024). Analysis of perforated sifting surfaces of separation equipment and prospects for their development. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (57)), 56-63. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.8>.

3. Харченко С.О., Біловод О.І.1, Харченко Ф.М., Стельмах А.М., Тіманов В.В., Чигрин А.І. Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. I. С.265-271.

4. Стельмах А.М. Моделювання динаміки сипких зернових матеріалів на перфорованих просіювальних віброповерхнях. *Вісник СНАУ: Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2025. Вип. 3 (61). С.125-134.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Харченко С., Харченко Ф., Стельмах А. Фактори ефективності решетного сепарування сипких середовищ // *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С.212.

6. Харченко Ф.М., Котляревський І.В., Стельмах А.М. Аналіз методів ідентифікації властивостей компонентів зернових сумішей при їх подальшому сепаруванні / *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського*

машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. – С.210-213.

7. Стельмах А.М., Рябка Д.О., Харченко С.О. Методика та результати поділу насіннєвих сумішей за розмірами / Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції (21-23 жовтня 2024 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2024 – С.137.

8. Research on methods and analysis of results of the natural oscillation frequency of cylindrical perforated sifting surfaces with riffles / S. Kharchenko, S. Samborski, F. Kharchenko, A. Stelmakh. 3rd Workshop on Experimental and Computational Mechanics – WECM '24, Lublin, 27 maja 2024 - 28 maja 2024. BOOK OF ABSTRACT. P.12.

9. Dynamics of loose materials and oscillations of perforated cylindrical sifting surfaces with volumetric riffles / S. Kharchenko, S. Samborski, F. Kharchenko, A. Mitura, J. Paśnik, A. Stelmakh. 10th International Scientific Symposium “Advances in techniques of production and machine construction”: program, Lublin, 26 maja 2024 - 29 maja 2024.

Список патентів:

10. Пат. на корисну модель 159886 Україна, МПК В07В 1/28. Решето / М.В. Бакум, UA; С.О. Харченко, UA; Ф.М. Харченко, UA; А.М. Стельмах, UA; та ін.; и 2024 05513; заявл. 21.11.24; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29.

11. Пат. на корисну модель 160024 Україна: МПК В07В 1/28. Профільоване решето / М.В. Бакум, UA; С.О. Харченко, UA; Ф.М. Харченко, UA; А.М. Стельмах, UA; та ін.; № и 2024 06046; заявл. 18.12.24; опубл. 30.07.2025, Бюл. № 31.

ДОДАТОК Б

КОДИ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО ОБЧИСЛЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ВИРАЗІВ

Б.1. Код для чисельного обчислення залежності швидкості руху сипкого зернового матеріалу

```
# Recreate the updated HTML app correctly (previous attempt truncated).
```

```
html_content = r"""<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="utf-8" />
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1" />
<title>u(y) — Профіль швидкості СЗМ (до 3 кривих, степінь 0.52633)</title>
<style>
:root {
  --bg: #0b0f14; --fg: #e6edf3; --muted: #9fb0c0; --accent: #57b6ff; --card: #121923; --grid: #2a3543;
}
* { box-sizing: border-box; }
body { margin:0; color:var(--fg); background:linear-gradient(180deg,#0b0f14 0%,#0f1a26 100%); font-family:system-ui,-apple-system,Segoe UI,Roboto,Arial; }
header { padding:16px 18px; border-bottom:1px solid #172232; background:#0d1520a6; backdrop-filter:blur(6px); position:sticky; top:0; z-index:10; }
h1 { margin:0; font-size:20px; letter-spacing:0.2px; }
main { display:grid; grid-template-columns: 460px 1fr; gap:18px; padding:18px; }
@media (max-width: 1160px) { main { grid-template-columns: 1fr; } }
.card { background:var(--card); border:1px solid #1b2635; border-radius:14px; padding:14px;
  box-shadow: 0 12px 30px rgba(0,0,0,0.22), 0 3px 8px rgba(0,0,0,0.25) inset; }
.card h2 { margin:6px 0 12px; font-size:16px; color:var(--accent); }
.row { display:grid; grid-template-columns: 1fr 1fr; gap:10px; margin-bottom:10px; }
.row3 { display:grid; grid-template-columns: 1fr 1fr 1fr; gap:10px; margin-bottom:10px; }
label { display:block; font-size:12px; color:var(--muted); margin-bottom:6px; }
input[type="number"] { width:100%; padding:10px 10px; border-radius:10px; border:1px solid #243246; background:#0f1622; color:var(--fg); }
.rowCheck { display:flex; align-items:center; gap:10px; margin: 8px 0 4px; }
.btn-bar { display:flex; flex-wrap:wrap; gap:10px; margin-top:8px; }
button { padding:10px 14px; border-radius:10px; border:1px solid #214363; background:#10324d; color:var(--fg); cursor:pointer; }
button:hover { transform: translateY(-1px); background:#123a59; }
button.primary { border-color:#2c6fad; background:#175391; }
.note { font-size:12px; color:var(--muted); margin-top:6px; line-height:1.35; }
```

```

canvas { width:100%; height:560px; background:#0a121c; border:1px solid #1b2635; border-radius:14px; }
.legend { display:flex; flex-wrap:wrap; gap:10px; margin-top:8px; font-size:12px; color:var(--muted); }
.pill { display:inline-flex; align-items:center; gap:6px; padding:2px 8px; border-radius:999px; border:1px solid
#2b3b53; background:#102033; }
.dot { width:10px; height:10px; border-radius:50%; display:inline-block; }
footer { text-align:center; color:var(--muted); font-size:12px; padding:14px; }
</style>
</head>
<body>
<header><h1>Профіль швидкості  $u(y)$  у шарі СЗМ — до трьох кривих</h1></header>
<main>
<section class="card">
  <h2>Спільні параметри (для всіх кривих), SI</h2>
  <div class="row">
    <div><label>Густина частинок  $\rho_p$  [кг/м3]</label><input id="rho_p" type="number" step="1" value="1300"
/></div>
    <div><label>Ефективна «в'язкість»  $\mu$  [Па·с]</label><input id="mu" type="number" step="0.01" value="5.0"
/></div>
  </div>
  <div class="row">
    <div><label>Кут нахилу  $\alpha$  [град]</label><input id="alpha_deg" type="number" step="0.1" value="12" /></div>
    <div><label>Коефіцієнт тертя  $f$  [-]</label><input id="f" type="number" step="0.01" value="0.12" /></div>
  </div>
  <div class="row">
    <div><label>Базова концентрація  $C_0$  [-]</label><input id="C0" type="number" step="0.01" value="0.60" /></div>
    <div><label>Товщина шару  $h$  [м]</label><input id="h" type="number" step="0.001" value="0.035" /></div>
  </div>
  <div class="row">
    <div><label>Швидкість ковзання  $u_s$  [м/с]</label><input id="us" type="number" step="0.001" value="0.05"
/></div>
    <div><label>Внутрішнє тертя у спокої  $f_0$  [-]</label><input id="f0" type="number" step="0.01" value="0.50"
/></div>
  </div>
  <div class="row">
    <div><label> $g$  [м/с2]</label><input id="g" type="number" step="0.01" value="9.81" /></div>
    <div><label>Точок по  $y$  (0..h)</label><input id="N" type="number" step="1" value="500" /></div>
  </div>

  <h2>Параметри для 1–3 кривих</h2>
  <div class="row3">
    <div><label>Амплітуда  $A_1$  [м]</label><input id="A1" type="number" step="0.0001" value="0.002" /></div>

```

```

    <div><label>Амплітуда  $A_2$  [М]</label><input id="A2" type="number" step="0.0001"
placeholder="(необов'язково)" /></div>
    <div><label>Амплітуда  $A_3$  [М]</label><input id="A3" type="number" step="0.0001"
placeholder="(необов'язково)" /></div>
</div>
<div class="row3">
    <div><label>Частота  $f_{v1}$  [Гц]</label><input id="F1" type="number" step="0.1" value="20" /></div>
    <div><label>Частота  $f_{v2}$  [Гц]</label><input id="F2" type="number" step="0.1" placeholder="(необов'язково)"
/></div>
    <div><label>Частота  $f_{v3}$  [Гц]</label><input id="F3" type="number" step="0.1" placeholder="(необов'язково)"
/></div>
</div>
<div class="row3">
    <div><label>Коеф. структурності  $K_{v1}$  [-]</label><input id="KV1" type="number" step="0.01" value="1.0"
/></div>
    <div><label>Коеф. структурності  $K_{v2}$  [-]</label><input id="KV2" type="number" step="0.01"
placeholder="(необов'язково)" /></div>
    <div><label>Коеф. структурності  $K_{v3}$  [-]</label><input id="KV3" type="number" step="0.01"
placeholder="(необов'язково)" /></div>
</div>

<div class="rowCheck">
    <input type="checkbox" id="altKV" />
    <label for="altKV"><b>Альтернативна модель (сильніший вплив  $K_v$ )</b>:
    <em> $a_1=0.3483 \cdot Q^{\{0.52633\}}$ ,  $a_2=K_v \cdot 0.6797 \cdot Q^{\{0.52633\}}$ </em>, де  $Q=\rho_p g h^3 \cos\alpha / (2C_0\psi)$ .</label>
</div>

<div class="btn-bar">
    <button class="primary" id="btnRun">Обчислити & Побудувати</button>
    <button id="btnReset">Скинути до типових</button>
    <button id="btnCSV">Експорт CSV</button>
    <button id="btnPNG">Експорт PNG</button>
</div>
<div class="note">
    За замовчуванням використовується <b>Емпірична (оновлена)</b>:
 $a_1=0.3483 \cdot (\rho_p g h^3 \cos\alpha / (2C_0 K_v \psi))^{\{0.52633\}}$ ;  $a_2=0.6797 \cdot (\dots)^{\{0.52633\}}$ .<br/>
    Якщо відмітити «Альтернативна модель», отримаєте сильнішу чутливість до  $K_v$ :  $a_2 \propto K_v$ .
</div>
</section>

<section class="card">
    <h2>Графік  $u(y)$ </h2>

```

```

<canvas id="plot" width="1100" height="580"></canvas>
<div class="legend" id="legend"></div>
</section>
</main>
<footer>HTML+JS (один файл). Відкрийте у браузері. ©</footer>

<script>
function $(id){ return document.getElementById(id); }
function readNum(id){ const v = $(id).value; return v === "" ? null : parseFloat(v); }

function commonParams(){
  return {
    rho_p: readNum("rho_p"),
    mu: readNum("mu"),
    alpha: (readNum("alpha_deg")||0) * Math.PI/180,
    f: readNum("f"),
    C0: readNum("C0"),
    h: readNum("h"),
    us: readNum("us"),
    f0: readNum("f0"),
    g: readNum("g"),
    N: Math.max(50, Math.floor(readNum("N")||500)),
    altKV: document.getElementById("altKV").checked
  };
}

function seriesParams(){
  const A = [readNum("A1"), readNum("A2"), readNum("A3")];
  const F = [readNum("F1"), readNum("F2"), readNum("F3")];
  const KV = [readNum("KV1"), readNum("KV2"), readNum("KV3")];
  return {A,F,KV};
}

const CURVE_COLORS = ["#ffb703", "#06d6a0", "#a78bfa"]; // фіксовані кольори

function computeCurve(idx, cp, A, F, KV){
  if (A===null || F===null || KV===null) return null; // пропускаємо неповні набори
  const {rho_p, mu, alpha, f, C0, h, us, f0, g, N, altKV} = cp;
  const omega = 2*Math.PI*f;

  // φ, ψ (2.24)
  const phi = 0.5 * f0 * (1 + Math.exp(-(A*omega*omega)/g));

```

```

const psi = (Math.sqrt(1+phi*phi) - phi) / (phi || 1);

// k та масштаб
let M = Math.sqrt( (rho_p * g * C0 / mu) * Math.cos(alpha) * (Math.tan(alpha) - f) );
if ( (Math.tan(alpha) - f) <= 0 ) M = 0;

// a1, a2 за обраною моделлю (експонента 0.52633)
const EXP = 0.52633;
const Q_emp = (rho_p * g * h*h*h * Math.cos(alpha)) / (2 * C0 * KV * psi); // емпірична
const Q_alt = (rho_p * g * h*h*h * Math.cos(alpha)) / (2 * C0 * 1 * psi); // альтернативна (без Kv у знаменнику)

let a1, a2;
if (!altKV){
  // Оновлена емпірична (2.24) з експонентою 0.52633
  a1 = 0.3483 * Math.pow(Q_emp, EXP);
  a2 = 0.6797 * Math.pow(Q_emp, EXP);
} else {
  // Альтернативна (сильніший вплив Kv): a2 ∝ Kv
  a1 = 0.3483 * Math.pow(Q_alt, EXP);
  a2 = KV * 0.6797 * Math.pow(Q_alt, EXP);
}

// коефіцієнти B0..B2
const B0 = 2/3;
const B1 = a1 / (10*h);
const B2 = (a2 / (21*h*h)) - (a1*a1)/(112*h*h);

// розрахунок u(y)
const y = [], u = [];
for (let i=0;i<N;i++){
  const yi = h * i / (N-1);
  const ui = us + M * ( B0*Math.pow(yi,1.5) + B1*Math.pow(yi,2.5) + B2*Math.pow(yi,3.5) );
  y.push(yi); u.push(ui);
}
return {y,u, meta:{A,F,KV,phi,psi,a1,a2,M, altKV}, color: CURVE_COLORS[idx]};
}

function run(){
  const cp = commonParams();
  const sp = seriesParams();
  const curves = [];
  for (let i=0;i<3;i++){

```

```

const c = computeCurve(i, cp, sp.A[i], sp.F[i], sp.KV[i]);
if (c) curves.push({idx:i, ...c});
}
if (curves.length===0){ alert("Заповніть хоча б один набір (Ai, fvi, Kvi)."); return; }
drawPlot(curves, cp.h);
renderLegend(curves, cp.altKV);
window.__last__ = {curves, cp};
}

function drawPlot(curves, h){
const canvas = document.getElementById("plot");
const ctx = canvas.getContext("2d");
const W = canvas.width, H = canvas.height;
ctx.clearRect(0,0,W,H);

const mL=70, mR=20, mT=20, mB=60;
const plotW = W - mL - mR, plotH = H - mT - mB;
const xmin=0, xmax=h;
let ymin=Infinity, ymax=-Infinity;
curves.forEach(c=>{
ymin = Math.min(ymin, ...c.u);
ymax = Math.max(ymax, ...c.u);
});
const padY = (ymax - ymin) * 0.08 || 0.01;
const Ymin = ymin - padY, Ymax = ymax + padY;

function X(x){ return mL + (x - xmin) * plotW / (xmax - xmin || 1); }
function Y(v){ return mT + plotH - (v - Ymin) * plotH / (Ymax - Ymin || 1); }

// сітка
ctx.strokeStyle = "#2a3543"; ctx.lineWidth = 1;
for (let i=0;i<=6;i++){
const x = mL + i*plotW/6; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(x,mT); ctx.lineTo(x,mT+plotH); ctx.stroke();
}
for (let j=0;j<=6;j++){
const y = mT + j*plotH/6; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL,y); ctx.lineTo(mL+plotW,y); ctx.stroke();
}

// oci
ctx.strokeStyle = "#e6edf3"; ctx.lineWidth = 1.5;
ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL, mT); ctx.lineTo(mL, mT+plotH); ctx.lineTo(mL+plotW, mT+plotH); ctx.stroke();

```

```

// підписи
ctx.fillStyle = "#9fb0c0"; ctx.font = "12px system-ui, -apple-system, Segoe UI, Roboto, Arial";
ctx.fillText("y, м", mL + plotW/2 - 10, H - 20);
ctx.save(); ctx.translate(16, mT + plotH/2); ctx.rotate(-Math.PI/2); ctx.fillText("u(y), м/с", 0, 0); ctx.restore();

// поділки
ctx.textAlign = "center";
for (let i=0;i<=6;i++){
  const xv = xmin + i*(xmax-xmin)/6;
  const xpx = X(xv);
  ctx.beginPath(); ctx.moveTo(xpx, mT+plotH); ctx.lineTo(xpx, mT+plotH+6); ctx.strokeStyle="#e6edf3"; ctx.stroke();
  ctx.fillText(xv.toFixed(3), xpx, mT+plotH+18);
}
ctx.textAlign = "right";
for (let j=0;j<=6;j++){
  const yv = Ymin + j*(Ymax-Ymin)/6;
  const ypx = Y(yv);
  ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL-6, ypx); ctx.lineTo(mL, ypx); ctx.strokeStyle="#e6edf3"; ctx.stroke();
  ctx.fillText(yv.toFixed(3), mL-8, ypx+4);
}

// криві
curves.forEach((c)=>{
  ctx.strokeStyle = c.color;
  ctx.lineWidth = 2.5;
  ctx.beginPath();
  for (let i=0;i<c.u.length;i++){
    const xpx = X(c.y[i]); const ypx = Y(c.u[i]);
    if (i===0) ctx.moveTo(xpx, ypx); else ctx.lineTo(xpx, ypx);
  }
  ctx.stroke();
});
}

function renderLegend(curves, altKV){
  const L = document.getElementById("legend"); L.innerHTML = "";
  const names = ["Крива 1", "Крива 2", "Крива 3"];
  const model = altKV ? "Альтернативна" : "Емпірична (оновлена)";
  const head = document.createElement("div");
  head.className = "pill";
  head.textContent = "Модель: " + model + " (ступінь 0.52633)";
  L.appendChild(head);
}

```

```

curves.forEach(c=>{
  const pill = document.createElement("span"); pill.className = "pill";
  const dot = document.createElement("span"); dot.className = "dot"; dot.style.background = c.color;
  pill.appendChild(dot);
  const text = document.createTextNode(` ${names[c.idx]}: A=${c.meta.A} м, f_v=${c.meta.F} Гц, K_v=${c.meta.KV}`);
  pill.appendChild(text);
  L.appendChild(pill);
});
}

```

```

function toCSV(curves){
  const y = curves[0].y;
  const rows = [];
  const header = ["y_m", "u1_m_per_s", "u2_m_per_s", "u3_m_per_s"];
  rows.push(header.join(", "));
  for (let i=0; i<y.length; i++){
    rows.push([
      y[i],
      curves.find(c=>c.idx===0)?.u[i] ?? "",
      curves.find(c=>c.idx===1)?.u[i] ?? "",
      curves.find(c=>c.idx===2)?.u[i] ?? ""
    ].join(", "));
  }
  return rows.join("\n");
}

```

```

function download(filename, content, mime){
  const blob = new Blob([content], {type: mime || "text/plain"});
  const url = URL.createObjectURL(blob);
  const a = document.createElement("a");
  a.href = url; a.download = filename; document.body.appendChild(a); a.click(); a.remove();
  setTimeout(()=>URL.revokeObjectURL(url), 500);
}

```

```

document.getElementById("btnRun").addEventListener("click", run);
document.getElementById("btnReset").addEventListener("click", ()=>{ window.location.reload(); });
document.getElementById("btnCSV").addEventListener("click", ()=>{
  const S = window.__last__;
  if (!S){ alert("Спочатку натисніть «Обчислити & Побудувати.»); return; }
  const csv = toCSV(S.curves);
  download("u_vs_y_multi.csv", csv, "text/csv");
}

```

```
});
document.getElementById("btnPNG").addEventListener("click", ()=>{
  const canvas = document.getElementById("plot");
  canvas.toBlob(b => download("u_plot_multi.png", b, "image/png"));
});
```

```
// автостарт з типовим набором 1
run();
</script>
</body>
</html>
""""

path = "/mnt/data/u_profile_plotter_multi.html"
with open(path, "w", encoding="utf-8") as f:
  f.write(html_content)
path
```

Б2. Код для визначення коефіцієнту структурності

Update HTML again to include captions under plots listing fixed parameters used.

```
html_content = r"""<!DOCTYPE html>
```

```
<html lang="uk">
```

```
<head>
```

```
<meta charset="UTF-8" />
```

```
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0"/>
```

```
<title>K_V Calculator — плоска ППП</title>
```

```
<style>
```

```
:root { --bg:#0f172a; --fg:#e5e7eb; --muted:#94a3b8; --card:#111827; --accent:#22d3ee; }
```

```
*{ box-sizing:border-box }
```

```
body{ margin:0;font-family:system-ui,-apple-system,Segoe UI,Roboto,Ubuntu,'Helvetica Neue',Arial;
```

```
background:linear-gradient(180deg,#0b1022,#0f172a);color:var(--fg);}
```

```
header{padding:20px 24px;border-bottom:1px solid #1f2937;position:sticky;top:0;background:#0b1022e6;backdrop-
filter: blur(6px);}
```

```
h1{ margin:0;font-size:20px;letter-spacing:.3px }
```

```
main{padding:24px;display:grid;grid-template-columns:420px 1fr;gap:24px;align-items:start }
```

```
.card{background:var(--card);border:1px solid #1f2937;border-radius:16px;box-shadow:0 6px 24px rgba(0,0,0,.35);}
```

```
.panel{padding:18px 18px 6px }
```

```
.panel h2{ margin:0 0 12px;font-size:16px;color:#cbd5e1 }
```

```
.grid{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:10px }
```

```
label{ font-size:12px;color:var(--muted) }
```

```
input{ width:100%;padding:10px 12px;background:#0b1220;border:1px solid #273449;border-radius:12px;color:var(--
fg);}
```

```

input:focus{outline:none;border-color:var(--accent);box-shadow:0 0 3px rgba(34,211,238,.15)}
.row{margin-bottom:10px}
.btns{display:flex;flex-wrap:wrap;gap:10px;margin:12px 0 2px}
button{padding:10px 14px;border:1px solid #273449;background:#0b1220;color:var(--fg);border-radius:12px;cursor:pointer}
button.primary{background:linear-gradient(135deg,#06b6d4,#22d3ee);color:#071018;border:none}
.result{padding:16px;border-top:1px dashed #223146;font-size:14px}
.pill{display:inline-block;background:#0b1220;border:1px solid #273449;border-radius:999px;padding:6px 10px;margin:4px 6px 0 0;font-size:12px;color:#b8c3d6}
canvas{background:#0b1220;border:1px solid #273449;border-radius:16px}
.plots{display:grid;grid-template-columns:1fr;gap:8px;padding:14px}
.muted{color:var(--muted);font-size:12px}
.caption{color:#9fb2c7;font-size:12px;margin:0 8px 14px 8px}
a.download{color:#67e8f9;text-decoration:none}
.inline{display:flex;align-items:center;gap:8px}
.hint{font-size:11px;color:#9aa9bf}
.switch{display:flex;align-items:center;gap:6px;margin:4px 0 0 0}
.switch input{width:auto}
</style>
</head>
<body>
<header><h1>Розрахунок коефіцієнта структурності  $K_V$  для плоскої ППП</h1></header>
<main>
<section class="card">
<div class="panel">
<h2>Вхідні параметри</h2>
<div class="row grid">
<div><label> $\rho$ , кг/м3</label><input id="rho" type="number" value="1500" step="1"></div>
<div><label> $g$ , м/с2</label><input id="g" type="number" value="9.81" step="0.01"></div>
</div>
<div class="row grid">
<div><label> $\alpha$ , градуси</label><input id="alpha" type="number" value="10" step="0.1"></div>
<div><label> $C_0$  (безрозм.)</label><input id="C0" type="number" value="0.60" step="0.01"></div>
</div>
<div class="row grid">
<div><label> $h$ , м</label><input id="h" type="number" value="0.05" step="0.001"></div>
<div><label> $\varphi_{h/C_0} = C(h)/C_0$  (безрозм.)</label><input id="phi_h" type="number" value="1.80" step="0.01"></div>
</div>
<div class="row grid">
<div><label> $C$  (концентрація в шарі, безрозм.)</label><input id="C" type="number" value="1.08" step="0.01"></div>

```

```

<div class="switch">
  <input id="autoPhi" type="checkbox" checked />
  <label for="autoPhi">Авто:  $\varphi_{\text{h}} = C / C_0$ </label>
</div>
</div>
<div class="row grid">
  <div><label> $f_0$  (коэф. тертя, безрозм.)</label><input id="f0" type="number" value="0.60" step="0.01"></div>
  <div><label>A, м</label><input id="A" type="number" value="0.005" step="0.0001"></div>
</div>
<div class="row grid">
  <div><label> $\omega$ , рад/с</label><input id="omega" type="number" value="160" step="1"></div>
  <div><label>К-сть десяткових знаків</label><input id="decimals" type="number" value="6" min="0"
max="10"></div>
</div>

<h2 style="margin-top:10px">Діапазони для графіків</h2>
<div class="row grid">
  <div><label>A<sub>min</sub>, мм</label><input id="Amin" type="number" value="0" step="0.1"></div>
  <div><label>A<sub>max</sub>, мм</label><input id="Amax" type="number" value="10" step="0.1"></div>
</div>
<div class="row grid">
  <div><label> $\omega$ <sub>min</sub>, рад/с</label><input id="Wmin" type="number" value="50" step="1"></div>
  <div><label> $\omega$ <sub>max</sub>, рад/с</label><input id="Wmax" type="number" value="300" step="1"></div>
</div>

<div class="btns">
  <button class="primary" id="calcBtn">Розрахувати  $K_V$ </button>
  <button id="plotBtn">Побудувати графіки</button>
  <button id="exportBtn">Експорт JSON</button>
</div>
<div class="result" id="resultBox">
  <div class="pill"> $\psi(\varphi_{\text{dyn}}) = (\sqrt{1+\varphi_{\text{dyn}}^2} - \varphi_{\text{dyn}}) / \varphi_{\text{dyn}}$ </div>
  <div class="pill"> $\varphi_{\text{dyn}} = f_0/2 \cdot (1 + e^{-A\omega^2/g})$ </div>
  <p class="muted"> $V(\varphi) = \int_1^{\varphi} \varphi \, d\varphi / (\varphi^2-1)^{1/3}$ </p>
  <p><b> $K_{V} = (3/4) \cdot (\rho g \cos\alpha) / (\psi C_0) \cdot (h / V(\varphi_{\text{h}}))^3$ </b></p>
  <div id="kvOut" class="hint"></div>
</div>
</div>
</section>

<section class="card">

```

```

<div class="plots">
  <canvas id="plot1" width="900" height="320"></canvas>
  <div id="cap1" class="caption"></div>
  <canvas id="plot2" width="900" height="320"></canvas>
  <div id="cap2" class="caption"></div>
  <canvas id="plot3" width="900" height="320"></canvas>
  <div id="cap3" class="caption"></div>
</div>
</section>
</main>

<footer>
  © KV Calculator (standalone HTML). Інтегрування: адаптивний Сімпсон. Вісі з поділками та значеннями.
</footer>

<script>
// ----- МАТЕМАТИКА -----
function deg2rad(d){ return d*Math.PI/180; }

// адаптивний Сімпсон для  $\int f(x) dx$ 
function adaptiveSimpson(f,a,b,eps,maxDepth){
  function simpson(f,a,b){
    const c=(a+b)/2;
    return (b-a)*(f(a)+4*f(c)+f(b))/6;
  }
  function asr(f,a,b,eps,whole,depth){
    const c=(a+b)/2;
    const left=simpson(f,a,c), right=simpson(f,c,b);
    const delta=left+right-whole;
    if(depth<=0 || Math.abs(delta)<=15*eps) return left+right+delta/15;
    return asr(f,a,c,eps/2,left,depth-1)+asr(f,c,b,eps/2,right,depth-1);
  }
  const whole=simpson(f,a,b);
  return asr(f,a,b,eps,whole,maxDepth);
}

//  $V(\varphi) = \int_1^\varphi d\varphi / (\varphi^2-1)^{1/3}$ 
function Vphi(phi){
  if(phi<=1) return 0;
  const eps = 1e-9;
  const a = 1 + eps;
  const f = p => 1/Math.cbrt((p*p - 1));

```

```

return adaptiveSimpson(f,a,phi,1e-8,20);
}
//  $\varphi_{\text{dyn}} = f_0/2 (1 + \exp(-(A \omega^2)/g))$ 
function phiDyn(A,omega,f0,g){
  return f0/2 * (1 + Math.exp(-(A*omega*omega)/g));
}
//  $\psi(\varphi_{\text{dyn}}) = (\sqrt{1+\varphi^2}-\varphi)/\varphi$ 
function psiFromPhiDyn(phi_d){
  return (Math.sqrt(1 + phi_d*phi_d) - phi_d) / phi_d;
}
// K_V
function KV(rho,g,alpha,C0,h,phi_h,psi){
  const V = Vphi(phi_h);
  const num = 0.75 * rho * g * Math.cos(alpha);
  return num / (psi * C0) * Math.pow(h / V, 3);
}
// ----- UI ЛОГИКА -----
const $ = id => document.getElementById(id);
const kvOut = $("kvOut");
const cap1 = $("cap1"), cap2 = $("cap2"), cap3 = $("cap3");

function readInputs(){
  const autoPhi = $("autoPhi").checked;
  const C0 = parseFloat($("C0").value);
  const C = parseFloat($("C").value);
  let phi_h = parseFloat($("phi_h").value);
  if(autoPhi){
    phi_h = C / C0;
    $("phi_h").value = phi_h.toFixed(6);
  }
  return {
    rho: parseFloat($("rho").value),
    g: parseFloat($("g").value),
    alpha: deg2rad(parseFloat($("alpha").value)),
    alpha_deg: parseFloat($("alpha").value),
    C0: C0,
    h: parseFloat($("h").value),
    phi_h: phi_h,
    f0: parseFloat($("f0").value),
    A: parseFloat($("A").value),
    omega: parseFloat($("omega").value),
    C: C,
  }
}

```

```

A_min: parseFloat($("#Amin").value)/1000,
A_max: parseFloat($("#Amax").value)/1000,
W_min: parseFloat($("#Wmin").value),
W_max: parseFloat($("#Wmax").value),
decimals: Math.max(0, Math.min(10, parseInt($("#decimals").value || "6",10)))
};
}
function round(x,n=6){ const p=Math.pow(10,n); return Math.round(x*p)/p; }

function computeKV(){
const p = readInputs();
const phi_d = phiDyn(p.A,p.omega,p.f0,p.g);
const psi = psiFromPhiDyn(phi_d);
const kv = KV(p.rho,p.g,p.alpha,p.C0,p.h,p.phi_h,psi);
kvOut.innerHTML = `
<div> $\phi_{\text{dyn}}$  = <b>${round(phi_d,p.decimals)}</b></div>
<div> $\psi$  = <b>${round(psi,p.decimals)}</b></div>
<div> $\phi_h$  = <b>${round(p.phi_h,p.decimals)}</b> (з  ("autoPhi").checked ? "C/C0" : "поля
phi")</div>
<div>K<sub>V</sub> = <b style="color:#22d3ee">${round(kv,p.decimals)}</b> (безрозмірний)</div>
`;
return {phi_d, psi, kv, phi_h:p.phi_h};
}

$("#calcBtn").addEventListener("click", computeKV);

// ----- ПЛОТИ З ПОДІЛКАМИ -----
function niceTicks(min, max, count){
const span = max - min || 1;
const step = Math.pow(10, Math.floor(Math.log10(span / count)));
const err = (count * step) / span;
let mult = 1;
if (err <= 0.15) mult = 10;
else if (err <= 0.35) mult = 5;
else if (err <= 0.75) mult = 2;
const niceStep = step * mult;
const niceMin = Math.floor(min / niceStep) * niceStep;
const niceMax = Math.ceil(max / niceStep) * niceStep;
const ticks = [];
for(let x = niceMin; x <= niceMax + 1e-12; x += niceStep) ticks.push(x);
return {ticks, niceMin, niceMax};
}

```

```

function plotLine(canvas, xs, ys, labelX, labelY, title, decimals=3){
  const ctx = canvas.getContext("2d");
  ctx.clearRect(0,0,canvas.width,canvas.height);
  const W = canvas.width, H = canvas.height;
  const m = {l:70, r:20, t:40, b:54};

  const xmin = Math.min(...xs), xmax = Math.max(...xs);
  const ymin = Math.min(...ys), ymax = Math.max(...ys);
  const xt = niceTicks(xmin, xmax, 6);
  const yt = niceTicks(ymin, ymax, 6);

  const x2px = x => m.l + (x - xt.niceMin) * (W - m.l - m.r) / (xt.niceMax - xt.niceMin || 1);
  const y2px = y => H - m.b - (y - yt.niceMin) * (H - m.t - m.b) / (yt.niceMax - yt.niceMin || 1);

  // axes
  ctx.strokeStyle = "#273449"; ctx.lineWidth = 1;
  ctx.beginPath();
  ctx.moveTo(m.l, H-m.b); ctx.lineTo(W-m.r, H-m.b);
  ctx.moveTo(m.l, H-m.b); ctx.lineTo(m.l, m.t);
  ctx.stroke();

  // grid + ticks + labels
  ctx.strokeStyle = "#1d2a3b"; ctx.setLineDash([3,4]);
  ctx.fillStyle = "#9fb2c7"; ctx.font = "12px system-ui";

  xt.ticks.forEach(t => {
    const x = x2px(t);
    ctx.beginPath(); ctx.moveTo(x, m.t); ctx.lineTo(x, H-m.b); ctx.stroke();
    ctx.fillText(t.toFixed(decimals), x-10, H-m.b+18);
  });
  yt.ticks.forEach(t => {
    const y = y2px(t);
    ctx.beginPath(); ctx.moveTo(m.l, y); ctx.lineTo(W-m.r, y); ctx.stroke();
    ctx.fillText(t.toFixed(decimals), 10, y+4);
  });
  ctx.setLineDash([]);

  // title
  ctx.fillStyle = "#cbd5e1"; ctx.font = "16px system-ui";
  ctx.fillText(title, m.l, m.t-12);
  // labels
  ctx.fillStyle = "#94a3b8"; ctx.font = "12px system-ui";

```

```

ctx.fillText(labelX, (W-m.r+m.l)/2-40, H-16);
ctx.save();
ctx.translate(16, (H-m.b+m.t)/2+40);
ctx.rotate(-Math.PI/2);
ctx.fillText(labelY, 0, 0);
ctx.restore();

// line
ctx.strokeStyle = "#22d3ee"; ctx.lineWidth = 2;
ctx.beginPath();
for(let i=0;i<xs.length;i++){
  const px = x2px(xs[i]), py = y2px(ys[i]);
  if(i===0) ctx.moveTo(px,py); else ctx.lineTo(px,py);
}
ctx.stroke();
}

function buildPlots(){
  const p = readInputs();
  const dec = Math.min(4, p.decimals);

  // 1) K_V vs A ( $\omega$  fixed) у заданих межах
  const omega = p.omega;
  const xsA = [], ysA = [];
  for(let A=p.A_min; A<=p.A_max+1e-12; A+= (p.A_max-p.A_min)/120 ){
    const phi_d = phiDyn(A, omega, p.f0, p.g);
    const psi = psiFromPhiDyn(phi_d);
    const kv = KV(p.rho,p.g,p.alpha,p.C0,p.h,p.phi_h,psi);
    xsA.push(A*1000); ysA.push(kv);
  }
  plotLine$("plot1", xsA, ysA, "A, мм", "K_V (безрозмірний)",
    "K_V(A) при  $\omega =$ " + p.omega.toFixed(1) + " рад/с", dec);
  cap1.textContent = `Фіксовано:  $\omega =$  ${p.omega.toFixed(1)} рад/с;  $f_0 =$  ${p.f0};  $C_0 =$  ${p.C0};  $h =$  ${p.h} м;  $\phi_h =$ 
  ${p.phi_h.toFixed(dec)};  $\rho =$  ${p.rho} кг/м3;  $\alpha =$  ${p.alpha_deg}°;  $g =$  ${p.g} м/с2. Діапазон:  $A \in$ 
  [${(p.A_min*1000).toFixed(1)}, ${p.A_max*1000}.toFixed(1)}] мм.`;

  // 2) K_V vs  $\omega$  (A fixed) у заданих межах
  const A = p.A;
  const xsW = [], ysW = [];
  for(let w=p.W_min; w<=p.W_max+1e-12; w+= (p.W_max-p.W_min)/150 ){
    const phi_d = phiDyn(A, w, p.f0, p.g);
    const psi = psiFromPhiDyn(phi_d);

```

```

const kv = KV(p.rho,p.g,p.alpha,p.C0,p.h,p.phi_h,psi);
xsW.push(w); ysW.push(kv);
}
plotLine($("#plot2"), xsW, ysW, "ω, рад/с", "K_V (безрозмірний)",
    "K_V(ω) при A = "+(p.A*1000).toFixed(1)+" мм", dec);
cap2.textContent = `Фіксовано: A = ${p.A*1000}.toFixed(1)} мм; f₀ = ${p.f0}; C₀ = ${p.C0}; h = ${p.h} м; φₕ =
${p.phi_h.toFixed(dec)}; ρ = ${p.rho} кг/м³; α = ${p.alpha_deg}°; g = ${p.g} м/с². Діапазон: ω ∈
[${p.W_min.toFixed(0)}, ${p.W_max.toFixed(0)}] рад/с.`;

// 3) K_V vs φ (φ_dyn як незалежна)
const xsP = [], ysP = [];
for(let phi=1.0; phi<=2.6+1e-12; phi+= (2.6-1.0)/120 ){
    const psi = psiFromPhiDyn(phi);
    const kv = KV(p.rho,p.g,p.alpha,p.C0,p.h,p.phi_h,psi);
    xsP.push(phi); ysP.push(kv);
}
plotLine($("#plot3"), xsP, ysP, "φ (безрозмірна)", "K_V (безрозмірний)",
    "K_V(φ): залежність від φ_dyn", dec);
cap3.textContent = `Фіксовано: f₀ лише для φ_dyn не використовується (φ — незалежна); C₀ = ${p.C0}; h = ${p.h}
м; φₕ = ${p.phi_h.toFixed(dec)}; ρ = ${p.rho} кг/м³; α = ${p.alpha_deg}°; g = ${p.g} м/с². Діапазон: φ ∈ [1.0, 2.6].`;
}
$("#plotBtn").addEventListener("click", buildPlots);

$("#exportBtn").addEventListener("click", ()=>{
    const p = readInputs();
    const comp = computeKV();
    const data = {
        inputs: p,
        computed: comp,
        V_phi_h: Vphi(p.phi_h)
    };
    const blob = new Blob([JSON.stringify(data,null,2)], {type: "application/json"});
    const url = URL.createObjectURL(blob);
    const a = document.createElement("a");
    a.href = url; a.download = "kv_results.json";
    a.click();
    setTimeout(()=>URL.revokeObjectURL(url), 1000);
});

// авто-розрахунок при завантаженні
computeKV();
buildPlots();

```

```

</script>
</body>
</html>
"""
with open("/mnt/data/kv_calculator.html","w",encoding="utf-8") as f:
    f.write(html_content)
"/mnt/data/kv_calculator.html"

```

Б.3. Код для обчислення продуктивності ППП

```

# Fix the bug: remove dependency on missing 'degRad' select and always treat alpha as degrees.
# Also add basic runtime error guard and show alerts if any calculation step returns NaN.
html = r"""<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="utf-8" />
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1" />
<title>ППП: Q за (2.39) + графіки Q(A), Q(fv), Q(Kv) — v3 (fixed)</title>
<style>
:root { --bg:#0b0f14; --fg:#e6edf3; --muted:#9fb0c0; --accent:#57b6ff; --card:#121923; --grid:#2a3543; }
*{ box-sizing:border-box }
body{ margin:0;color:var(--fg);background:linear-gradient(180deg,#0b0f14 0%,#0f1a26 100%);
font-family:system-ui,-apple-system,Segoe UI,Roboto,Arial }
header{ padding:16px 18px;border-bottom:1px solid #172232;background:#0d1520a6;backdrop-
filter:blur(6px);position:sticky;top:0;z-index:10 }
h1 { margin:0;font-size:20px;letter-spacing:.2px }
main{ display:grid;grid-template-columns: 520px 1fr;gap:18px;padding:18px }
@media (max-width: 1200px){ main{ grid-template-columns:1fr } }
.card{ background:var(--card);border:1px solid #1b2635;border-radius:14px;padding:14px;
box-shadow:0 12px 30px rgba(0,0,0,.22), 0 3px 8px rgba(0,0,0,.25) inset }
.card h2 { margin:6px 0 12px;font-size:16px;color:var(--accent) }
.row{ display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:10px;margin-bottom:10px }
.row3{ display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr 1fr;gap:10px;margin-bottom:10px }
label{ display:block;font-size:12px;color:var(--muted);margin-bottom:6px }
input[type="number"],select{ width:100%;padding:10px;border-radius:10px;border:1px solid
#243246;background:#0f1622;color:var(--fg) }
.btn-bar{ display:flex;flex-wrap:wrap;gap:10px;margin-top:8px }
button{ padding:10px 14px;border-radius:10px;border:1px solid #214363;background:#10324d;color:var(--
fg);cursor:pointer }
button:hover{ transform:translateY(-1px);background:#123a59 }
button.primary{ border-color:#2c6fad;background:#175391 }
.note{ font-size:12px;color:var(--muted);margin-top:6px;line-height:1.35 }

```

```

.out{font-family:ui-monospace, SFMono-Regular, Menlo, Consolas, monospace; background:#0f1622; border:1px
solid #243246; border-radius:12px; padding:12px}
.grid2{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr; gap:12px}
.kv{display:grid;grid-template-columns: auto 1fr; gap:8px 14px; align-items:center}
.kv div.key{ color:#9fb0c0}
canvas{width:100%;height:520px;background:#0a121c;border:1px solid #1b2635;border-radius:14px}
footer{color:var(--muted);font-size:12px;text-align:center;padding:14px}
</style>
</head>
<body>
<header><h1>Калькулятор продуктивності ППП + графіки залежностей (v3, виправлено)</h1></header>
<main>
<section class="card">
<h2>Вхідні дані</h2>
<div class="row">
<div><label>Густина частинок  $\rho_p$  [кг/м3]</label><input id="rho_p" type="number" step="1" value="1300"></div>
<div><label>Гравітація  $g$  [м/с2]</label><input id="g" type="number" step="0.01" value="9.81"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Динам. в'язкість  $\mu$  [Па·с]</label><input id="mu" type="number" step="0.001" value="5.0"></div>
<div><label>Кут нахилу  $\alpha$  [град]</label><input id="alpha_deg" type="number" step="0.1" value="12"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Коеф. тертя  $f$  [-]</label><input id="f" type="number" step="0.01" value="0.12"></div>
<div><label>Товщина шару  $h$  [м]</label><input id="h" type="number" step="0.001" value="0.035"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Базова концентрація  $C_0$  [-]</label><input id="C0" type="number" step="0.01" value="0.60"></div>
<div><label>Коеф. структурності  $K_v$  [-] (для базового Q)</label><input id="KV" type="number" step="0.01"
value="1.50"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Внутр. тертя у спокої  $f_0$  [-]</label><input id="f0" type="number" step="0.01" value="0.50"></div>
<div><label>Амплітуда коливань  $A$  [м]</label><input id="A" type="number" step="0.0001"
value="0.002"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Частота коливань  $f_v$  [Гц]</label><input id="Fv" type="number" step="0.1" value="20"></div>
<div><label>Експонента  $p$  у (2.24)</label><input id="pExp" type="number" step="0.00001"
value="0.52633"></div>
</div>
<div class="row">

```

```

<div><label>Швидкість ковзання  $u_0$  [м/с]</label><input id="u0" type="number" step="0.001"
value="0.05"></div>
<div><label>Ширина ППП В [м]</label><input id="B" type="number" step="0.01" value="1.2"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Довжина ППП L [м]</label><input id="L" type="number" step="0.01" value="2.0"></div>
<div><label>Одиниці на графіку</label>
<select id="units">
<option value="kgps">Q, кг/с</option>
<option value="tph">Q, т/год</option>
</select>
</div>
</div>

<div class="btn-bar">
<button class="primary" id="btnCalc">Обчислити базові Q та q</button>
<button id="btnCSV">Експорт результатів CSV</button>
</div>

<h2>Побудова графіка Q(x)</h2>
<div class="row">
<div>
<label>Змінна для сканування</label>
<select id="scanVar">
<option value="A">Амплітуда A [м]</option>
<option value="Fv">Частота  $f_v$  [Гц]</option>
<option value="KV">Коеф. структурності  $K_v$  [-]</option>
</select>
</div>
<div><label>Точок</label><input id="Npts" type="number" step="1" value="60"></div>
</div>
<div class="row">
<div><label>Мінімум змінної</label><input id="Xmin" type="number" step="0.0001" value="0.0005"></div>
<div><label>Максимум змінної</label><input id="Xmax" type="number" step="0.0001" value="0.005"></div>
</div>
<div class="btn-bar">
<button class="primary" id="btnPlot">Побудувати Q(x)</button>
<button id="btnCSVcurve">Експорт CSV</button>
<button id="btnPNG">Експорт PNG графіка</button>
</div>
<div class="note">Під  $f_v$  або  $K_v$  не забудьте змінити Xmin/Xmax на відповідні діапазони.</div>
</section>

```

```

<section class="card">
  <h2>Результати</h2>
  <div class="grid2">
    <div class="out" id="outMain">Натисніть «Обчислити...» для базової точки.</div>
    <div class="out" id="outAux">—</div>
  </div>
</section>

<section class="card">
  <h2>Графік Q(x)</h2>
  <canvas id="plot" width="1100" height="520"></canvas>
</section>
</main>
<footer>HTML+JS (один файл). Відкрийте у браузері. ©</footer>

<script>
function $(id){ return document.getElementById(id); }
function readNum(id){ const v=$(id).value; return v===""?null:parseFloat(v); }

function compute_a1_a2_and_Q(params){
  const {rho_p,g,mu,alpha,f,h,C0,KV,f0,A,Fv,p,u0,B,L} = params;
  // guard
  const arr = [rho_p,g,mu,alpha,f,h,C0,KV,f0,A,Fv,p,u0,B,L];
  if(arr.some(v => typeof v!="number" || !isFinite(v))){ throw new Error("Некоректні вхідні дані."); }

  const omega = 2*Math.PI*Fv;
  const phi = 0.5*f0*(1 + Math.exp(-(A*omega*omega)/(g|9.81)));
  const psi = (Math.sqrt(1+phi*phi) - phi) / (phi || 1);

  const base = (rho_p * g * h*h*h * Math.cos(alpha)) / (2 * C0 * KV * psi);
  const a1 = 0.3483 * Math.pow(base, p);
  const a2 = 0.6797 * Math.pow(base, p);

  const tanMinusF = Math.tan(alpha) - f;
  const D = tanMinusF>0 ? Math.sqrt( (g * Math.cos(alpha) / mu) * tanMinusF ) : 0;

  const S = (2/5)
    + (3*a1*h)/7
    + (1/3)*(a2 + (a1*a1)/4)*h*h
    + (a1/22)*(3*a2 - (a1*a1)/2)*h*h*h
    + (3/52)*a2*(a2 - a1*a1)*h*h*h*h;
}

```

```

const Q = D * C0 * Math.sqrt(C0) * rho_p * B * Math.pow(h, 2.5) * S
  + rho_p * h * B * C0 * u0 * (1 + a1*h + a2*h*h);

const q = Q / (L * B);

if([a1,a2,psi,phi,D,S,Q,q].some(v => !isFinite(v))) throw new Error("Проміжні значення NaN/Inf. Перевірте параметри.");
return {Q,q,a1,a2,psi,phi,D,S};
}

function getInputs(){
  // В цій версії  $\alpha$  завжди у градусах  $\rightarrow$  переводимо в радіани
  let alpha_deg = readNum("alpha_deg");
  let alpha = (alpha_deg||0) * Math.PI/180;
  return {
    rho_p: readNum("rho_p"), g: readNum("g"), mu: readNum("mu"),
    alpha, f: readNum("f"), h: readNum("h"), C0: readNum("C0"),
    KV: readNum("KV"), f0: readNum("f0"), A: readNum("A"),
    Fv: readNum("Fv"), p: readNum("pExp")||0.52633, u0: readNum("u0"),
    B: readNum("B"), L: readNum("L")  }; }

function valid(params){
  return Object.values(params).every(v => typeof v==="number" && isFinite(v) && v>=0); }

let lastRes=null;
function calcBase(){
  try{
    const P=getInputs();
    if(!valid(P)){ alert("Перевірте введення — є порожні або від'ємні значення."); return; }
    const R=compute_a1_a2_and_Q(P);
    lastRes = {inputs:P, ...R};

    const Q_tph = R.Q*3.6, q_tphm2=R.q*3.6;
    $("outMain").innerHTML = `Q = ${R.Q.toExponential(6)} кг/с (~ ${Q_tph.toFixed(3)} т/год)<br/>q =
    ${R.q.toExponential(6)} кг/(с·м²) (~ ${q_tphm2.toFixed(3)} т/(год·м²)}`;
    $("outAux").innerHTML = `
    <div class="kv">
      <div class="key"> $\alpha$  (рад):</div><div>${P.alpha.toFixed(5)}</div>
      <div class="key"> $\phi$ :</div><div>${R.phi.toExponential(6)}</div>
      <div class="key"> $\psi$ :</div><div>${R.psi.toExponential(6)}</div>
      <div class="key"> $a_1$ :</div><div>${R.a1.toExponential(6)}</div>

```

```

    <div class="key">a2:</div><div>${R.a2.toExponential(6)}</div>
    <div class="key">D:</div><div>${R.D.toExponential(6)}</div>
    <div class="key">S:</div><div>${R.S.toExponential(6)}</div>
  </div>`;
}catch(e){
  alert("Помилка розрахунку: "+e.message); } }

```

```

function toCSVBase(){
  if(!lastRes){ alert("Спочатку обчисліть базові значення."); return; }
  const i = lastRes.inputs, R=lastRes;
  const rows = [
    ["param","value","unit"],
    ["Q_kg_s", R.Q, "kg/s"],
    ["q_kg_s_m2", R.q, "kg/(s·m2)"],
    ["a1", R.a1, "-"],
    ["a2", R.a2, "-"],
    ["psi", R.psi, "-"],
    ["phi", R.phi, "-"],
    ["D", R.D, "sqrt(m)/sqrt(s)"],
    ["S", R.S, "-"],
    ["rho_p", i.rho_p, "kg/m3"],
    ["g", i.g, "m/s2"],
    ["mu", i.mu, "Pa·s"],
    ["alpha", i.alpha, "rad"],
    ["f", i.f, "-"],
    ["h", i.h, "m"],
    ["C0", i.C0, "-"],
    ["KV", i.KV, "-"],
    ["f0", i.f0, "-"],
    ["A", i.A, "m"],
    ["Fv", i.Fv, "Hz"],
    ["p", i.p, "-"],
    ["u0", i.u0, "m/s"],
    ["B", i.B, "m"],
    ["L", i.L, "m"] ];
  return rows.map(r=>r.join(",")).join("\n"); }

```

```

function sweepAndPlot(){
  try{
    const P=getInputs();
    if(!valid(P)){ alert("Перевірте введення — є порожні або від'ємні значення."); return; }
    const varName = $("scanVar").value;

```

```

const N = Math.max(10, Math.floor(readNum("Npts")||60));
const xmin = readNum("Xmin"), xmax=readNum("Xmax");
if(!(xmax>xmin)){ alert("Xmax має бути більшим за Xmin."); return; }

const xs=[], Qs=[];
for(let i=0;i<N;i++){
  const x = xmin + (xmax-xmin)*i/(N-1);
  const P2 = {...P};
  if(varName==="A") P2.A = x;
  else if(varName==="Fv") P2.Fv = x;
  else if(varName==="KV") P2.KV = x;
  const R=compute_a1_a2_and_Q(P2);
  xs.push(x);
  Qs.push(R.Q); }
drawPlot(xs, Qs, varName, $("units").value);
window.__curve__ = {xs, Qs, varName, units:$("units").value};
}catch(e){
  alert("Помилка побудови графіка: "+e.message); } }

```

```

function drawPlot(xs, Qs, varName, units){
  const canvas=$("plot"), ctx=canvas.getContext("2d");
  const W=canvas.width, H=canvas.height;
  ctx.clearRect(0,0,W,H);
  const mL=70,mR=20,mT=20,mB=60;
  const plotW=W-mL-mR, plotH=H-mT-mB;
  const xmin=Math.min(...xs), xmax=Math.max(...xs);
  let ys = units==="kgps" ? Qs : Qs.map(q=>q*3.6);
  const ymin=Math.min(...ys), ymax=Math.max(...ys);
  const padX=(xmax-xmin)*0.08 || 0.01, padY=(ymax-ymin)*0.08 || 0.01;
  const Xmin=xmin-padX, Xmax=xmax+padX;
  const Ymin=ymin-padY, Ymax=ymax+padY;
  const X=x=>mL+(x-Xmin)*plotW/(Xmax-Xmin||1);
  const Y=v=>mT+plotH-(v-Ymin)*plotH/(Ymax-Ymin||1);

  // grid
  ctx.strokeStyle="#2a3543"; ctx.lineWidth=1;
  for(let i=0;i<=6;i++){ const x=mL+i*plotW/6; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(x,mT); ctx.lineTo(x,mT+plotH);
  ctx.stroke(); }
  for(let j=0;j<=6;j++){ const y=mT+j*plotH/6; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL,y); ctx.lineTo(mL+plotW,y);
  ctx.stroke(); }

  // axes

```

```

ctx.strokeStyle="#e6edf3"; ctx.lineWidth=1.5;
ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL,mT); ctx.lineTo(mL,mT+plotH); ctx.lineTo(mL+plotW,mT+plotH); ctx.stroke();

// labels
ctx.fillStyle="#9fb0c0"; ctx.font="12px system-ui,-apple-system,Segoe UI,Roboto,Arial";
const xlabel = varName===="A" ? "A, м" : (varName===="Fv" ? "fv, Γп" : "Kv, -");
const ylabel = units===="kgps" ? "Q, кг/с" : "Q, т/год";
ctx.fillText(xlabel, mL+plotW/2-10, H-20);
ctx.save(); ctx.translate(16, mT+plotH/2); ctx.rotate(-Math.PI/2); ctx.fillText(ylabel, 0, 0); ctx.restore();

// ticks
ctx.textAlign="center";
for(let i=0;i<=6;i++){ const xv=Xmin+i*(Xmax-Xmin)/6; const xpx=X(xv);
  ctx.beginPath(); ctx.moveTo(xpx,mT+plotH); ctx.lineTo(xpx,mT+plotH+6); ctx.strokeStyle="#e6edf3"; ctx.stroke();
  const lab = Math.abs(xv)<0.001 ? xv.toExponential(1) : xv.toFixed( (Math.abs(xv)<1)?4:2 );
  ctx.fillText(lab, xpx, mT+plotH+18); }
ctx.textAlign="right";
for(let j=0;j<=6;j++){ const yv=Ymin+j*(Ymax-Ymin)/6; const ypx=Y(yv);
  ctx.beginPath(); ctx.moveTo(mL-6,ypx); ctx.lineTo(mL,ypx); ctx.strokeStyle="#e6edf3"; ctx.stroke();
  ctx.fillText(yv.toExponential(2), mL-8, ypx+4); }

// curve
ctx.strokeStyle="#ffb703"; ctx.lineWidth=2.5;
ctx.beginPath();
for(let i=0;i<ys.length;i++){ const xpx=X(xs[i]), ypx=Y(ys[i]); if(i===0) ctx.moveTo(xpx,ypx); else
ctx.lineTo(xpx,ypx); }
ctx.stroke();
ctx.fillStyle="#ffb703";
for(let i=0;i<ys.length;i++){ const xpx=X(xs[i]), ypx=Y(ys[i]); ctx.beginPath(); ctx.arc(xpx, ypx, 3, 0, 2*Math.PI);
ctx.fill(); } }

function csvCurve(){
  const S=window.__curve__;
  if(!S){ alert("Спочатку побудуйте криву."); return; }
  const rows=[S.varName + ", " + (S.units===="kgps"?"Q_kg_s":"Q_t_h")];
  for(let i=0;i<S.xs.length;i++){
    const qv = S.units===="kgps" ? S.Qs[i] : S.Qs[i]*3.6;
    rows.push(`${S.xs[i]},${qv}`); }
  return rows.join("\n"); }

function download(filename, content, mime){
  const blob=new Blob([content],[type:mime||"text/plain"]);

```

```

const url=URL.createObjectURL(blob);
const a=document.createElement("a"); a.href=url; a.download=filename; document.body.appendChild(a); a.click();
a.remove();
setTimeout(()=>URL.revokeObjectURL(url),500); }

$("btnCalc").addEventListener("click", calcBase);
$("btnCSV").addEventListener("click", ()=>{
  const csv = toCSVBase();
  if(csv) download("PPP_base_results.csv", csv, "text/csv"); });

$("btnPlot").addEventListener("click", sweepAndPlot);
$("btnCSVcurve").addEventListener("click", ()=>{
  const csv = csvCurve();
  if(csv) download("PPP_Q_vs_x.csv", csv, "text/csv"); });
$("btnPNG").addEventListener("click", ()=>{
  $("plot").toBlob(b=>download("PPP_Q_vs_x.png", b, "image/png")); });
</script>
</body>
</html>""

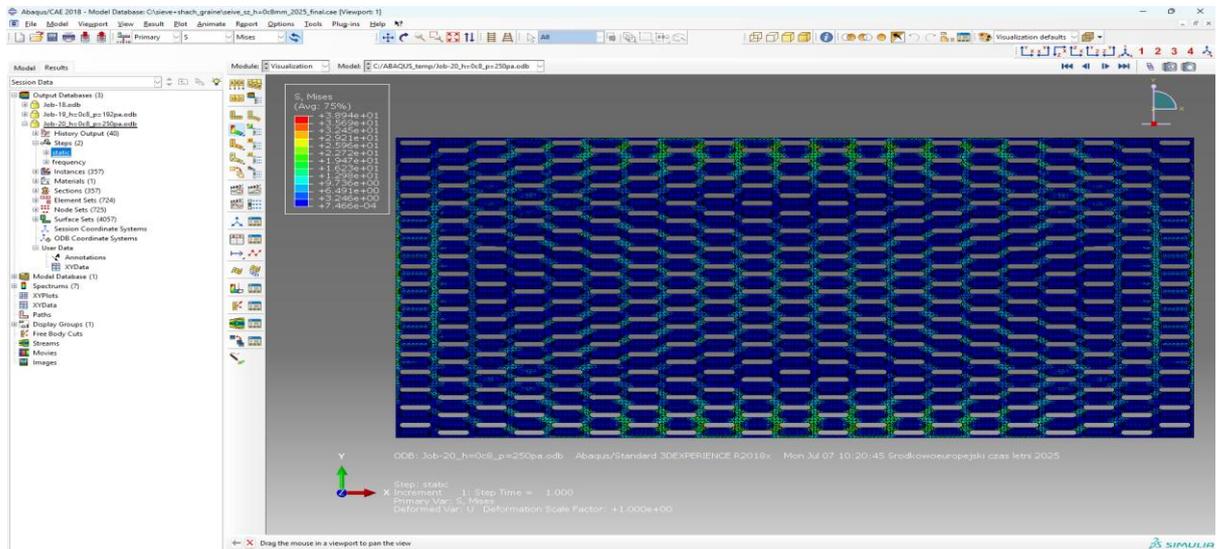
path = "/mnt/data/ppp_productivity_with_plots_v3_fixed.html"
with open(path, "w", encoding="utf-8") as f:
    f.write(html)

```

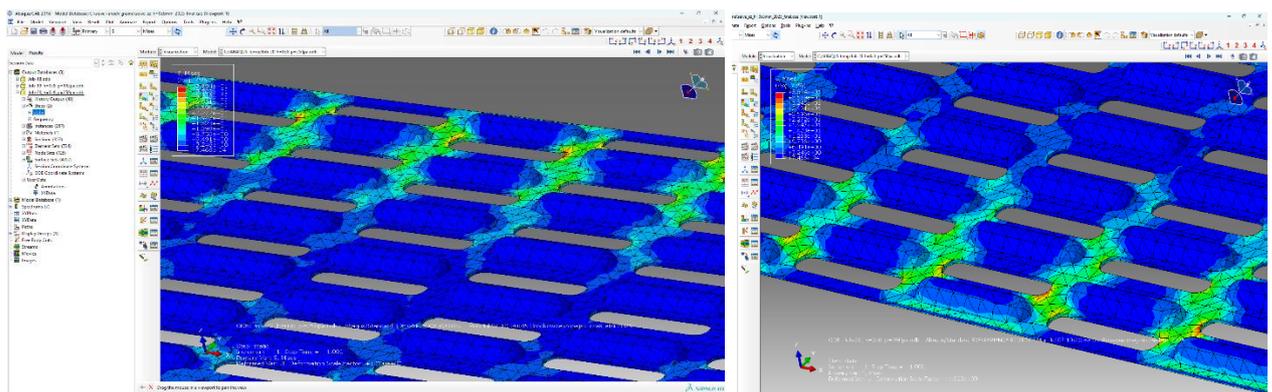
path

ДОДАТОК В

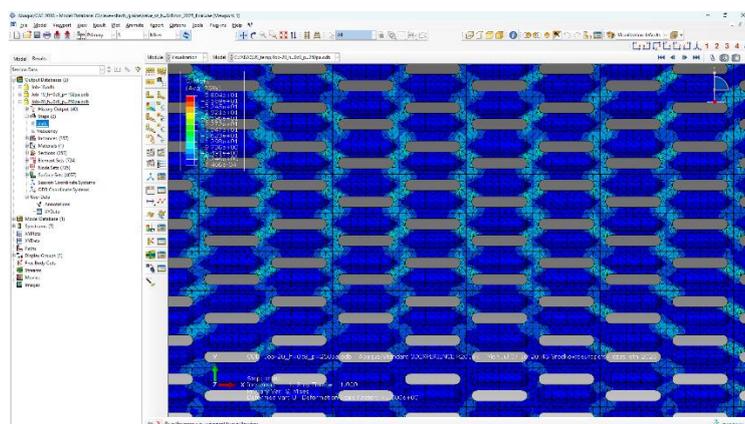
РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО (МСЕ) МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ППП ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ



а

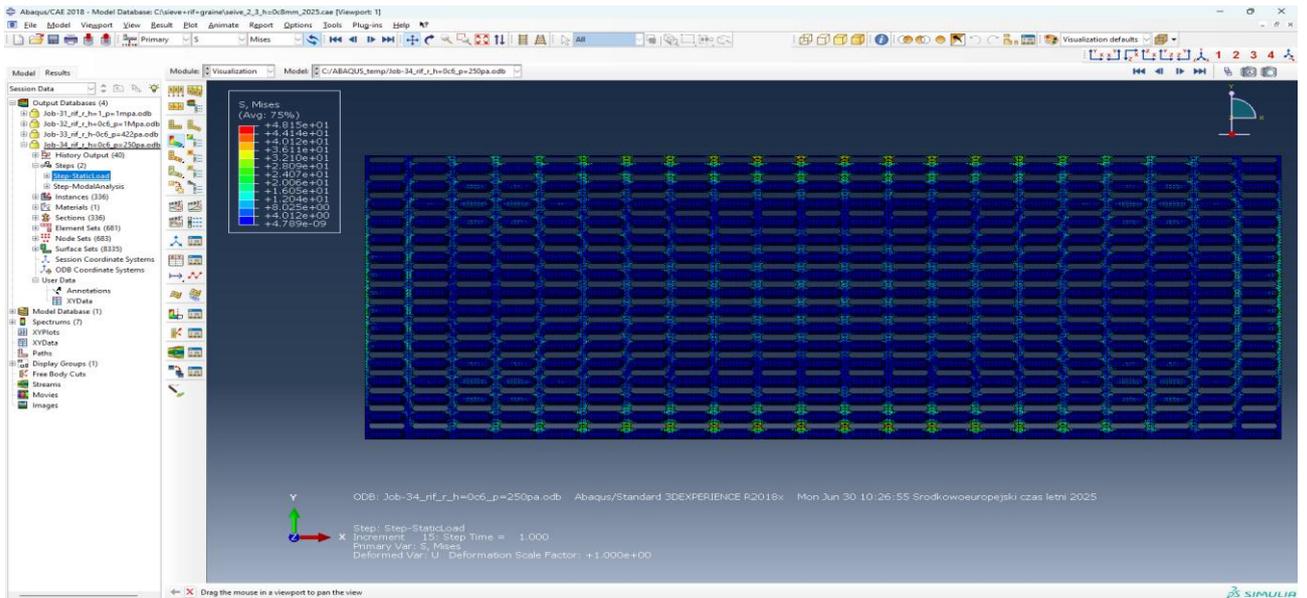


б

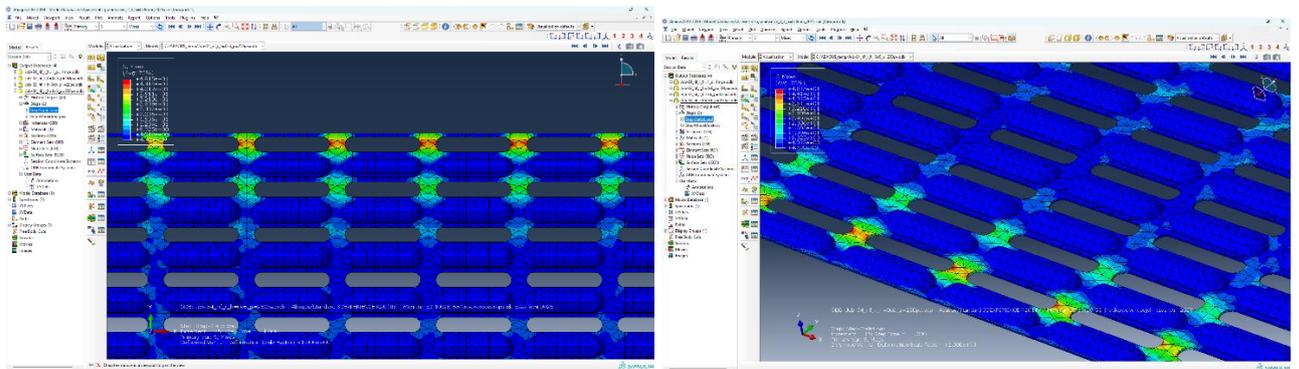


в

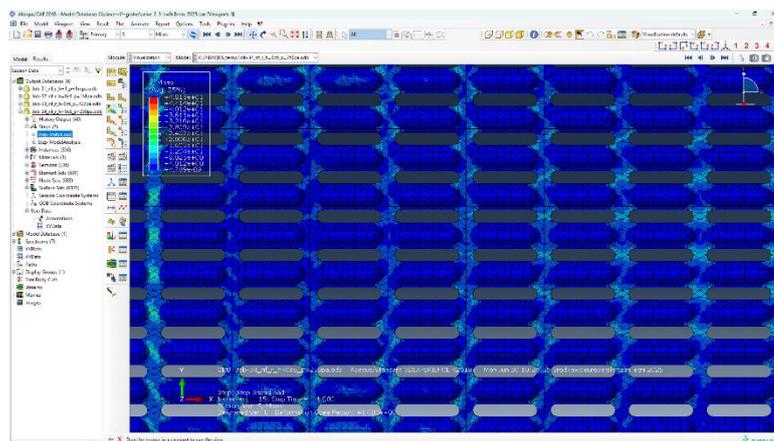
Рисунок В.1 – Візуалізація результатів визначення напруження в ППП (шахове розташування ОЕ, товщина 0.8мм, тип профілю ОЕ- напівколо, СЗМ кукурудзи): а – повна ППП; б – периферійна зона; в – центральна зона



а

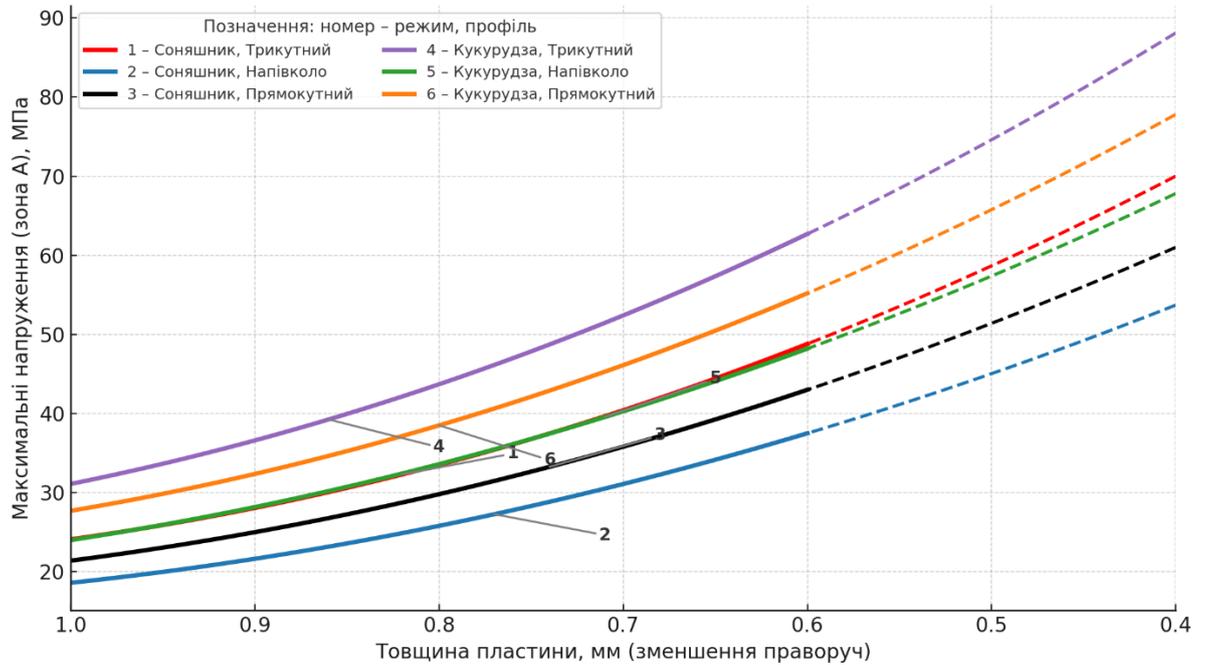


б

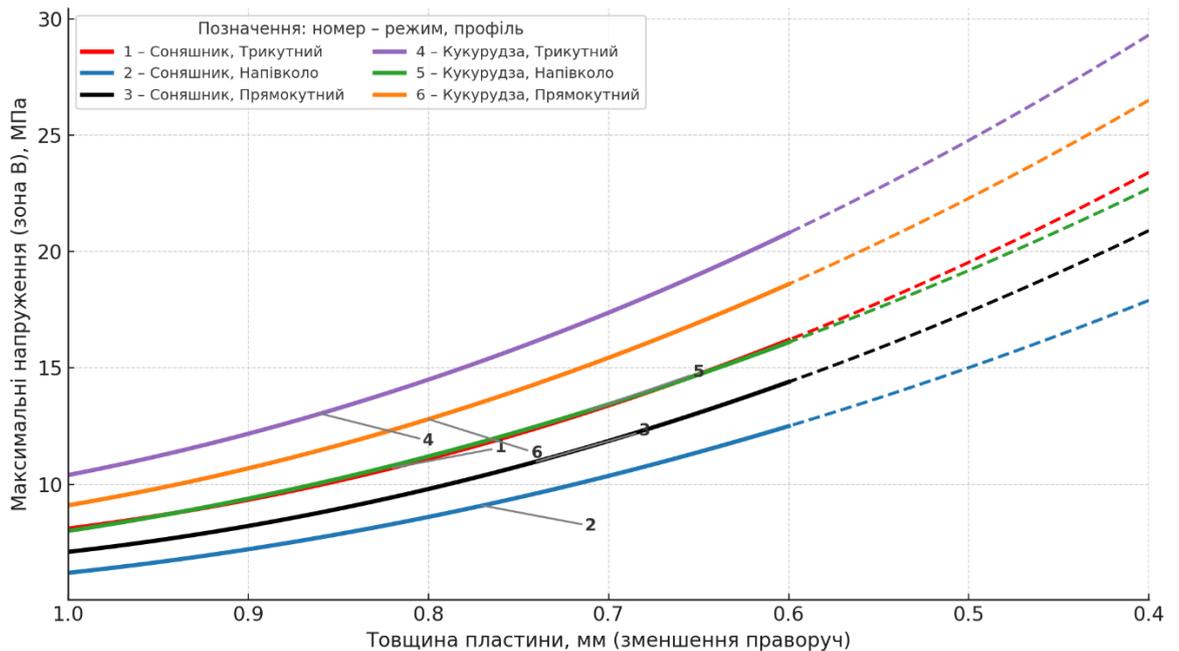


в

Рисунок В.2 – Візуалізація результатів визначення напруження в ППП (рядне розташування ОЕ, товщина 0.6мм, тип профілю ОЕ- напівколо, СЗМ - кукурудзи): а – повна ППП; б – периферійна зона; в – центральна зона



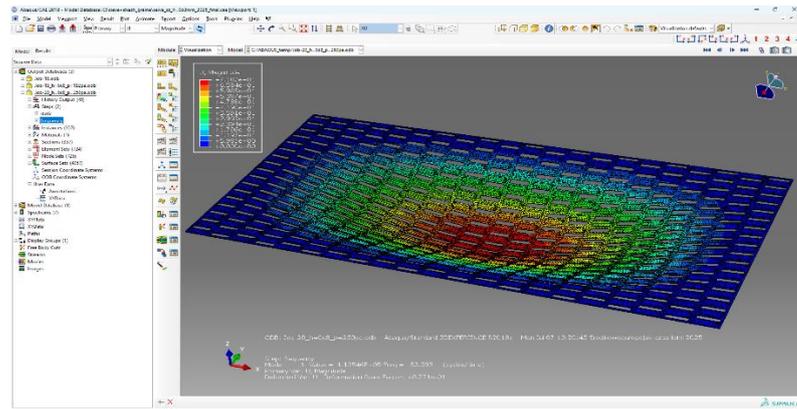
а



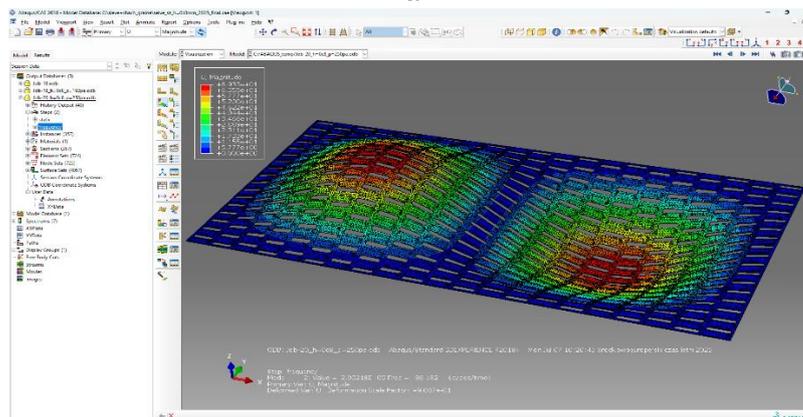
б

Рисунок В.3 – Залежність напружень ППП від її товщини та рядного розташування ОЕ з наступними типами профілю: а – периферійна зона А; б – центральна зона В;

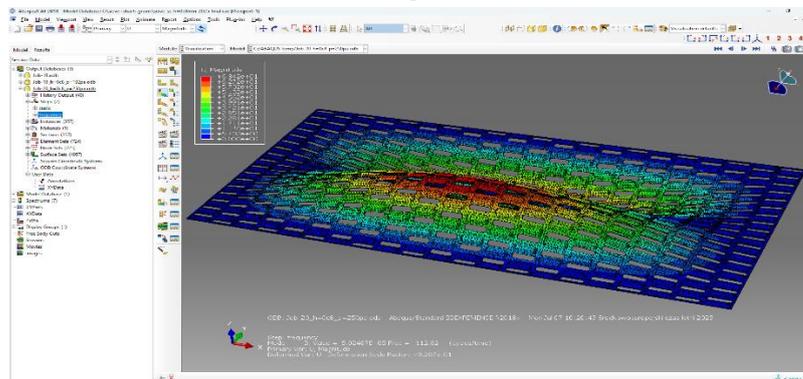
1 – трикутний (СЗМ соняшнику); 2 – напівколо (СЗМ соняшнику); 3 – прямокутний (СЗМ соняшнику); 4 – трикутний (ЗСМ кукурудзи); 5 – напівколо (СЗМ кукурудзи); 6 – прямокутний (СЗМ кукурудзи); ----- - фактичні данні; - - - - прогнозовані (апроксимовані)



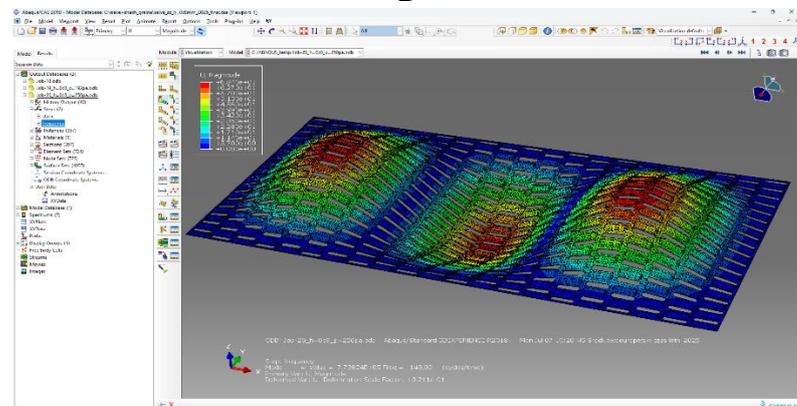
а



б

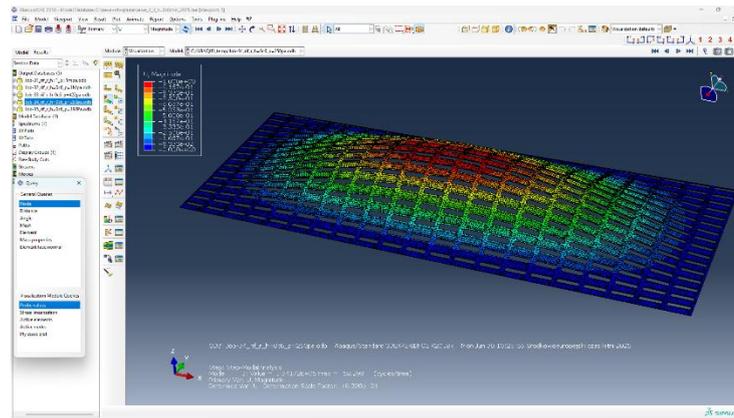


в

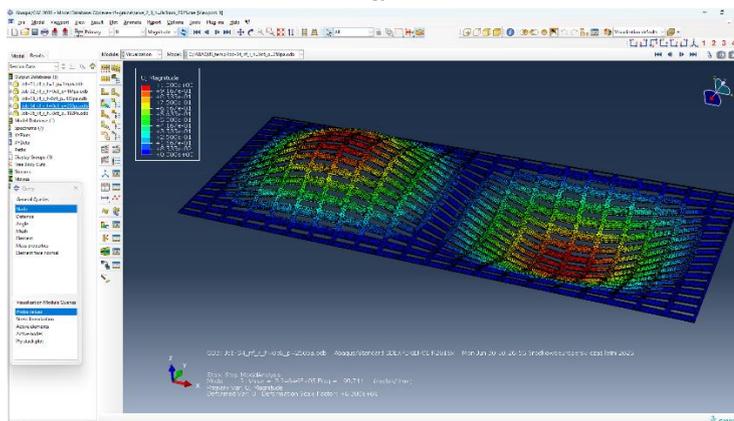


г

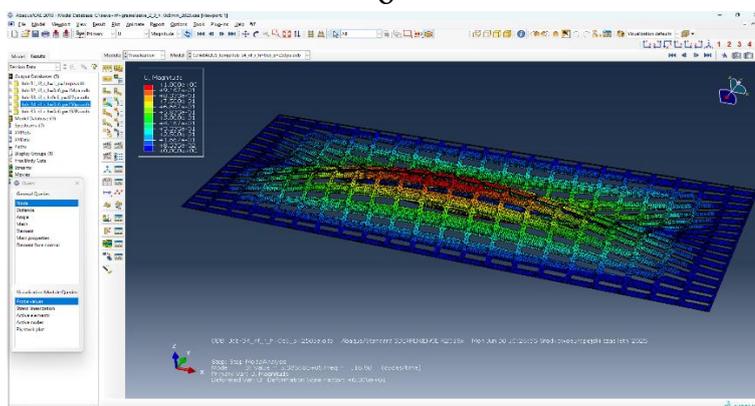
Рисунок В.4 – Частоти власних коливань ППП з шаховим розташванням ОЕ у вигляді напівкола (товщина 0.8мм, СЗМ - кукурудзи):
а – мода 1; б – мода 2; в – мода 3; г – мода 4



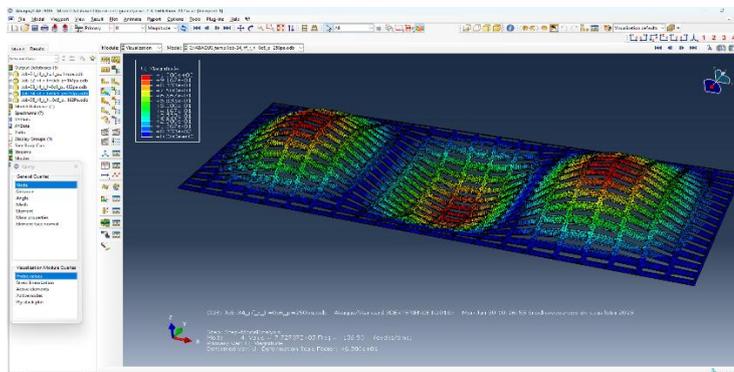
а



б



в



г

Рисунок В.5 – Частоти власних коливань ППП з рядним розташуванням ОЕ у вигляді напівкола (товщина 0.6мм, СЗМ - кукурудзи):
а – мода 1; б – мода 2; в – мода 3; г – мода 4

ДОДАТОК Д

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

На підставі апріорної інформації встановлено, що на процес сепарування СЗМ на плоских ППП впливають ряд факторів (табл.В.1).

Таблиця Д.1 – Фактори, що впливають на процес сепарування СЗМ

№	Група параметрів	Назва (позначення)
1	Кінематичні	Амплітуда (A) та частота коливань (ω) ППП
2	Конструктивні	Кут нахилу (α) ППП
3		Довжина (L) та ширина (B) ППП
4		Ширина (T_h) та довжина (L_h) отвору
5		Тип профілю ОЕ та спосіб їх розташування
6		Висота (h_r) та ширина (b_r) ОЕ
7		Кількість отворів (N_o) та ОЕ (N_r)
8		Технологічні
9	Початковий вміст домішкового компоненту (n) СЗМ	
10	Властивості СЗМ	Щільність (ρ) ЗСМ
11		Кут природнього скосу (φ) ЗСМ
12		Коефіцієнт тертя (f)
13		Ширина (t_g), товщина (b_g) та довжина (l_g) компонентів
14		Густина компонентів (ρ_p)

Обраним критерієм оптимізації став основний технологічний показник ефективності процесу сепарування СЗМ – продуктивність (Q) виражена в кг/с при фіксованій площі ППП. При цьому якість процесу сепарування СЗМ фіксувалась на рівні – повнота поділу компонентів складала 95%. У разі невідповідності повноти поділу експеримент вважався не коректним та повторювався.

На підставі традиційних експериментів, даним моделювання та відомим досліджень встановлені наступні значущі фактори, які спричиняють найбільший вплив на ефективність процесу сепарування СЗМ: висота ОЕ (h_r), коефіцієнт

проникності ППП (ε), висота шару СЗМ (h). Обрані фактори визначають основні групи параметрів: технологічні та конструктивні. Інші фактори (табл.Д.1) фіксувалися та не варіювалися в процесі досліджень. Так, досліди проведено з фіксованими технологічними параметрами та властивостями СЗМ кукурудзи: вміст домішкового компоненту $n=20\%$, вологості до 14% , щільності $\rho=730\text{кг/м}^3$, середнім еквівалентним діаметром $d=0,006\text{мм}$. Крім того, деякі параметри ППП (фактори) також були зафіксовані: амплітуда коливань ППП $A=8\text{ мм}$, частота коливань ППП $\omega=75,9\text{ с}^{-1}$, кут нахилу ППП $\alpha=8^\circ$, довжина ППП $L=0,77\text{м}$, ширина ППП $B=0,25\text{м}$, тип профілю ОЕ – напівколо, спосіб розташування – шаховий.

Подальше визначення оптимального співвідношення між факторами проведено за використанням методики планування експерименту.

Д.1. Результати дослідження процесу сепарування СЗМ

Перед початком експерименту були назначені рівні варіювання факторів (див. табл.В.2) і проведено їх кодування:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (\text{Д.1})$$

де: x_i – кодування значень фактору, верхній рівень якого позначено (+1), а нижній – (-1); X_i – натуральне значення фактору; X_{0i} – натуральне значення фактору на нульовому рівні; ε_i – натуральне значення інтервалу варіювання фактору.

Таблиця Д.2 – Кодовані значення факторів

Рівень і інтервал варіювання факторів	Фактори		
	Відносна висота ОЕ (поправочний коефіцієнт K_r)	Кількість підшарів СЗМ N_L , шт	Коефіцієнт проникності ППП ε , %
	X_1	X_2	X_3
+1	0,75	7	0,31
0	0,5	5	0,28
-1	0,25	3	0,25
ε	0,25	2	0,03

Для визначення оптимального поєднання встановлених факторів, що забезпечує максимальну величину продуктивності ППП, було проведено експеримент з 15 дослідів.

Матриці планування експерименту і визначені середні значення критеріїв оптимізації після трьох повторювань представлені в табл. Д.3.

Для отримання математичних залежностей впливу обраних факторів на процес сепарування СЗМ був реалізований факторний експеримент по плану Бокса-Бенкіна.

Таблиця Д.3 – Матриця планування і результати дослідів при дослідженні

№ точки плану	Рандомізація дослідів		x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₃ ²	Результати експериментів		
												y ₁	y ₂	y ₃
1	64	14	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,023	0,025	0,024
2	40	9	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,029	0,028	0,025
3	90	15	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,021	0,02	0,021
4	40	10	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,026	0,027	0,027
5	20	3	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,006	0,006	0,005
6	26	5	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,014	0,016	0,015
7	18	2	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,009	0,008	0,01
8	31	6	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,01	0,012	0,011
9	36	7	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,037	0,038	0,037
10	44	11	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,036	0,038	0,039
11	21	4	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,038	0,037	0,039
12	46	12	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,032	0,033	0,031
13	03	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038	0,037	0,039
14	60	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,036	0,037	0,039
15	39	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038	0,039	0,036

При сепаруванні СЗМ кукурудзи відповідно до матриці планування експерименту встановлювали задане поєднання факторів і визначали

продуктивність дослідної ППП. При цьому прохідну повноту поділу обмежували на рівні 95%.

Після досліду визначали значення критерія (у) продуктивність ППП Q та трикратні результати вносили до табл.В.3.

Відтворюваність при однаковому числі паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів факторів перевірялась за критерієм Кохрена по формулі:

$$G = \frac{S_{u_{max}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{u_{12}}^2}, \quad (Д.2)$$

де: $S_y^2 = \frac{\sum_{n=1}^m (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{m-1}$ – дисперсія, яка характеризує розсіювання результатів дослідів на u -тому поєднанні факторів; $n = 1, 2, 3, \dots, m$ – число повторювань дослідів; $S_{u_{max}}^2$ – найбільша з дисперсій в строчках плану; $G(0,05; f_1; f_2)$ – табличне значення критерію Кохрена при 5%-ому рівні значимості; $f_1 = m-1$ – число ступенів свободи кожної оцінки; $f_2 = N$ – число незалежних оцінок дисперсії; y_{ui} – значення критерія оптимізації в i -тому досліді; \bar{y}_i – середнє значення критерія оптимізації.

Для отримання розрахункового значення критерію Кохрена була складена допоміжна таблиця Д.4, за допомогою якої визначали дисперсію, яка характеризує розсіювання результатів дослідів на u -тому поєднанні факторів.

В результаті дослідів за даними таблиці Д.3 розрахунковий критерій Кохрена склав $G_{розр} = 0,27259$. Табличне значення критерію Кохрена з числом ступенів свободи $f = m-1 = 2$ и $f = N = 15$, $G_{табл} = 0,3346$.

Як видно $G_{розр} = 0,27259 < G_{табл} = 0,3346$, тому процес вважається відтворюваним. При цьому дисперсія відтворюваності (похибка досліду) склала $S_y^2 = 0,00105$.

За відомими формулами були розраховані коефіцієнти регресії математичної моделі:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u}{N}, \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{N}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}, \quad (Д.3)$$

де: \bar{y}_u – значення критерію оптимізації, яке отримано в u -тому досліді; N – кількість дослідів; x_{iu} – значення фактору в u -тому досліді; x_{iu}, x_{ju} – значення двох факторів при їх взаємодії.

Таблиця Д.4 – Допоміжна таблиця для розрахунку значень дисперсії

Номер дослідів	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S_u^2
1	0.023	0.025	0.024	0.024	0.000001
2	0.029	0.028	0.025	0.0273	0.00000433
3	0.0205	0.021	0.021	0.0208	0.00000008
4	0.026	0.0266	0.027	0.0265	0.00000025
5	0.0061	0.0065	0.0066	0.0064	0.00000007
6	0.0138	0.0142	0.0145	0.0142	0.00000012
7	0.009	0.008	0.01	0.009	0.000001
8	0.01	0.012	0.011	0.011	0.000001
9	0.0364	0.0369	0.0372	0.0368	0.00000016
10	0.0382	0.0387	0.0391	0.0387	0.00000002
11	0.038	0.037	0.039	0.038	0.000001
12	0.032	0.033	0.031	0.032	0.000001
13	0.038	0.037	0.039	0.038	0.000001
14	0.036	0.037	0.039	0.0373	0.00000233
15	0.038	0.039	0.036	0.0377	0.00000233

Коефіцієнти регресії, які визначені за (Д.3), мають значення:

$$b_0=0.0377; b_{13}=0.000142; b_1=-0.00235; \quad b_{23}=0.00138; b_2=0.00082;$$

$$b_{11}=-0.019613; b_3=-0.0017; \quad b_{22}=0.006621; b_{12}=0.000992; b_{33}=-0.00791.$$

В результаті розрахунків коефіцієнтів регресії отримано рівняння регресії в наступному вигляді:

$$y = 0,0377 - 0,00235x_1 + 0,00082x_2 - 0,0017x_3 + 0,000992x_{12} + 0,000142x_{13} + \\ + 0,00138x_{23} - 0,019613x_1^2 + 0,006621x_2^2 - 0,00791x_3^2. \quad (Д.4)$$

Оцінка значимості коефіцієнтів регресії проводили за допомогою критерія Стьюдента порівнянням коефіцієнтів регресії з довірчим інтервалом:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t(0,05; f_y) \sqrt{\frac{S^2\{b\}}{N}}, \quad (Д.5)$$

де: $t(0,05; f_y)$ – 5%-ва точка розподілу Стюдента з $f_y=N(m-1)$ ступенями свободи; $S^2\{b\}$ – дисперсії, які характеризують похибки у визначені коефіцієнтів регресії:

$$S^2\{b_0\}=0,00000012; S^2\{b_i\}=0,00000004; S^2\{b_{ij}\}=0,00000009; S^2\{b_{ii}\}=0,00000001.$$

Тоді в результаті розрахунку довірчі інтервали коефіцієнтів регресії (півширини Δb , 95%) мають значення:

$$\Delta b_0 = 0,000701; \quad \Delta b_i = 0,000429; \quad \Delta b_{ij} = 0,000607; \quad \Delta b_{ii} = 0,000632.$$

Порівняння коефіцієнтів регресії з довірчими інтервалами (перевірка $|b| \geq \Delta b$) (табл.В.5).

Таблиця Д.5 – Перевірка коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти регресія		Довірчі інтервали		Виконання умови
позначення	значення	позначення	значення	
b_0	0,037667	Δb_0	0,000701	так
b_1	-0,00235	Δb_i	0,000429	так
b_2	0,00082			так
b_3	-0,0017			так
b_{12}	0,000992	Δb_{ij}	0,000607	так
b_{13}	0,000142			ні
b_{23}	0,00138			так
b_{11}	-0,019613	Δb_{ii}	0,000632	так
b_{22}	0,006621			так
b_{33}	-0,00791			так

Після порівняння абсолютних значень коефіцієнтів регресії з абсолютною величиною їх довірливого інтервалу (табл.Д.5) приходимо до висновку, що істотний вплив на показник продуктивності ППП здійснюють всі фактори окрім b_{13} бо $|b_{13}| = 0,000142 < \Delta b_{13} = 0,000607$.

Тому рівняння регресії в кінцевому виді буде мати вигляд:

$$y = 0.0377 - 0,00235x_1 + 0,00082x_2 - 0,0017x_3 + 0,000992x_{12} + \\ + 0,00138x_{23} - 0,019613x_1^2 + 0,006621x_2^2 - 0,00791x_3^2. \quad (\text{Д.6})$$

Для перевірки гіпотези про адекватність моделі другого порядку проведено статистичний аналіз рівняння регресії.

Дану перевірку здійснювали за допомогою F -критерія (критерія Фішера):

$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (\text{Д.7})$$

де: S_{LF}^2 – дисперсія неадекватності математичної моделі; S_y^2 – дисперсія помилки досліду.

Дисперсія неадекватності математичної моделі:

$$S_{LF}^2 = \frac{m_f \sum_{u=1}^N (\bar{y} - \tilde{y}_u)^2}{N - k_f - 1}, \quad (\text{Д.8})$$

де: m_f – число повторювань одного досліду (однієї строки матриці); k_f – число факторів; y_u – значення критерія оптимізації, яке визначено з рівняння регресії.

Дисперсія, яка характеризує помилку досліду:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^{m_f} (y_{iu} - \bar{y})^2}{N(m_f - 1)}, \quad (\text{Д.9})$$

де: y_{iu} – значення критерію оптимізації в паралельних дослідах.

Після складання рівнянь регресії проводили перевірку прийнятої гіпотези на адекватність. Визначення за оцінкою адекватності зведено до таблиці Д.6.

За результатами допоміжної таблиці визначені значення дисперсії адекватності $S_{ad}^2 = 0,000004$; розрахункового критерію Фішера $F_{розр} = 0,7$. Табличне значення критерію Фішера з числом ступенів свободи $f_1 = N - k - 1 = 11$ і $f_2 = N(m - 1) = 30$ склало $F_{табл} = 2,53$.

Так як $F_{розр} = 0,7 < F_{табл} = 2,53$, то гіпотезу про адекватність описання рівнянням (Д.6) результатів експерименту можна рахувати вірною з 95%-вою вірогідністю.

Для використання рівняння регресії (Д.6) в якості розрахункової формули і інтерпретації результатів дослідів призводили його розкодування за формулами:

- при перетворенні лінійних членів рівняння

$$b_i x_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_i - \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_{0i}, \quad (\text{Д.10})$$

- при перетворенні членів рівняння, які містять взаємодію

$$b_{ij} x_i x_j = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \varepsilon_j} (X_i X_j - X_i X_{0j} - X_j X_{0i} + X_{0i} X_{0j}), \quad (\text{Д.11})$$

- при перетворенні квадратних членів рівняння

$$b_{ii} x_i^2 = \frac{b_{ii}}{\varepsilon_i^2} (X_i^2 - 2X_i X_{0i} + X_{0i}^2). \quad (\text{Д.12})$$

Таблиця Д.6 – Допоміжна таблиця для розрахунку значення критерію Фішера

Номер дослідю	\bar{Y}	\hat{Y}_u	$(\bar{Y} - \hat{Y}_u)^2$
1	0.024	0.02413	0.00000002
2	0.0273	0.0272	0.00000002
3	0.0208	0.020517	0.00000001
4	0.0265	0.02685	0.00000001
5	0.0064	0.00623	0.00000003
6	0.01417	0.01433	0.00000003
7	0.009	0.00935	0.00000012
8	0.011	0.01065	0.00000012
9	0.03683	0.03687	0.00000001
10	0.0387	0.03863	0.00000001
11	0.038	0.037517	0.00000023
12	0.032	0.032483	0.00000023
13	0.038	0.03767	0.00000011
14	0.0373	0.03767	0.00000011
15	0.03767	0.03767	0.00000001

Коефіцієнти регресії в розкодованому вигляді мають значення:

$$B_0 = 0,819751; B_1 = -0,33313; B_2 = 0,00953; B_3 = -5,09469;$$

$$B_{12} = 0,00198; B_{23} = 0,023; B_{11} = -0,31381; B_{22} = 0,00166;$$

$$B_{33} = -8,79111.$$

Коефіцієнти отримані при $X_1 \in [0,25; 0,75]$, $X_2 \in [3; 7]$, $X_3 \in [0,25; 0,31]$ відповідно даним в табл.Д.2. Конструкція перетворення гарантує, що у точці центру $X = X_0$ модель у натуральних змінних дає те саме значення, що й у кодованих: $Y(X_0) = b_0 = 0,03767$.

В результаті отримано рівняння регресії процесу сепарування СЗМ на дослідній ППП в розкодованому вигляді (у натуральних змінних):

$$Q(h_r, N_L, \varepsilon) = 0,819751 - 0,333128h_r + 0,009531 N_L - 5,094689\varepsilon + \\ + 0,001984h_r N_L + 0,023000 N_L \varepsilon - 0,313808 h_r^2 + 0,001655 N_L^2 - 8,791111 \varepsilon^2, \quad (\text{В.13})$$

де: h_r – відносна висота ОЕ; N_L – кількість підшарів СЗМ (шт); ε – коефіцієнт проникності ППП.

Вираз (В.13) в розкодованому вигляді дозволяє визначити розрахунковим шляхом величину продуктивності ППП при виборі значень факторів, які лежать в області експерименту. Рівняння регресії (Д.13) також може бути використано при конструюванні ППП з метою вибору їх параметрів.

Розрахункові дані, які отримані за допомогою рівняння (Д.13), узгоджуються з експериментальними. Так, наприклад, для дослідів проведеного при $h_r=0,5$, $N_L=5$ та $\varepsilon =0,28$ за рівнянням (Д.13) найшли, що показник коефіцієнту ефективності повинен бути рівним $Q =0,03767$ кг/с. В результаті експерименту за трьома точками плану Бокса-Бенкіна, що відповідає нульовому значенню факторів, отримано продуктивність ППП $Q= 0,038$ кг/с.

Для визначення значень факторів, які забезпечують оптимальне протікання процесу сепарування СЗМ на дослідній ППП, складаємо систему диференціальних рівнянь, які представляють приватні похідні по кожному з трьох факторів.

Система диференціальних рівнянь, яка отримана з (Д.6), має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = -0,00235 + 0,000992x_2 + 2(-0,019613)x_1 = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0,00082 + 0,000992x_1 + 2(-0,006621)x_2 + 0,00138x_3 = 0. \quad (\text{Д.14}) \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = -0,0017 + 0,00138x_2 + 2(-0,007912)x_3 = 0. \end{cases}$$

Приврівнюючи до нуля приватні похідні і вирішивши систему відносно невідомих, визначали оптимальні значення факторів $x_{1S}=-0,0611$; $x_{2S}=-0,0457$; $x_{3S}=-0,1114$. З отриманих даних видно, що вибраний центр експерименту розташовано поблизу від особливої точки області експерименту, який представляє оптимальне поєднання факторів. Оптимальне значення критерію оптимізації при цьому склало $Q=0,0378$ кг/с.

Для вивчення поверхні відгуку в області експерименту, що відповідає рівнянню регресії, проведено канонічне перетворення його до стандартного виду.

Рівняння регресії, що представлено у канонічній формі, має вид:

$$Y - 0,03782 = -0,01962 x_1^2 - 0,00794 x_2^2 + 0,00666 x_3^2. \quad (Д.15)$$

Для забезпечення інтерпретації отриманих результатів дослідження при вивченні поверхні відгуку був використаний метод двомірних перетинів. Побудова двомірних перетинів функції відгуку виконувалися в такий спосіб. В отримане рівняння регресії (Д.6) підставлялися закодовані значення всіх факторів, крім будь-якого одного, причому в першу чергу досліджувалися ті перетини, які мають найбільш практичне значення. Далі в отриманому виразі визначався центр поверхні відгуку, і проводили канонічне перетворення моделі другого порядку.

Після канонічного перетворення визначався тип поверхні відгуку, і проводився графо-аналітичний аналіз отриманого виразу.

Найбільше практичне значення впливу факторів на ефективність сепарування СЗМ має двомірний перетин поверхні відгуку, що характеризує продуктивність ППП в залежності від відносної висоти ОЕ (hr) і кількості підшарів СЗМ (N_L).

Для отримання цього перетину підставляємо значення $x_3=0$ в (Д.15).

В результаті маємо:

$$y = 0,03767 - 0,00235 x_1 + 0,00082 x_2 + 0,000992 x_1 x_2 - \\ -0,019613 x_1^2 + 0,006621 x_2^2. \quad (Д.16)$$

Для визначення центру поверхні відгуку складена система диференціальних

рівнянь, що представляють частинні похідні за факторами x_1 і x_2 :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = -0,00235 + 0,000992x_2 - 0,039226x_1 = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0,00082 + 0,000992x_1 + 0,013242x_2 = 0, \end{cases} \quad (\text{Д.17})$$

Після рішення системи диференціальних рівнянь (В.17) відносно невідомих були визначені координати центра поверхні відгуку: $x_{1S} = -0,061$; $x_{2S} = -0,049$.

Підставляючи значення x_{1S} і x_{2S} в (Д.16), отримали значення продуктивності ППП в центрі поверхні відгуку дорівнює $Q = 0,03772$ кг/с.

Для канонічного перетворення рівняння (Д.16) розв'язуємо його характеристичне рівняння:

$$B^2 + 0,012992 B - 0,0001295 = 0. \quad (\text{Д.18})$$

Власними коренями (канонічні коефіцієнти) рівняння (Д.18) будуть: $B_{11} = -0,0196$; $B_{22} = 0,00661$, а саме рівняння в канонічній формі має вигляд:

$$Y - 0,0378 = -0,0196x_1^2 + 0,00661 x_2^2. \quad (\text{Д.19})$$

Кут повороту нових координатних вісей в центрі поверхні відгуку для нашого випадку $\alpha = -1,08^\circ$.

Далі використана прикладна програма MATLAB, якою за (Д.19) виконали побудову графіку поверхні відгуку (рис.Д.1) і її двомірний перетин у вигляді відповідних контурних кривих – еліпсів, в сукупності представляє ціле сімейство пов'язаних еліпсів (ліній рівного значення продуктивності ППП).

З рисунку Д.1 видно, що компромісне значення продуктивності ППП в перетині поверхні відгуку яке розглядається $Q = 0,0377$ кг/с і має місце при відносній висоті ОЕ $h_r = 0,49$ і кількості підшарів СЗМ $N_L = 4,9$ штук.

Аналізом рисунку встановлено, що допустимі значення факторів (при допустимому значенні продуктивності ППП $Q = 0,036 \dots 0,038$ кг/с) знаходиться в межах $h_r = 0,45 \dots 0,55$ і $N_L = 4,5 \dots 5,5$ шт.

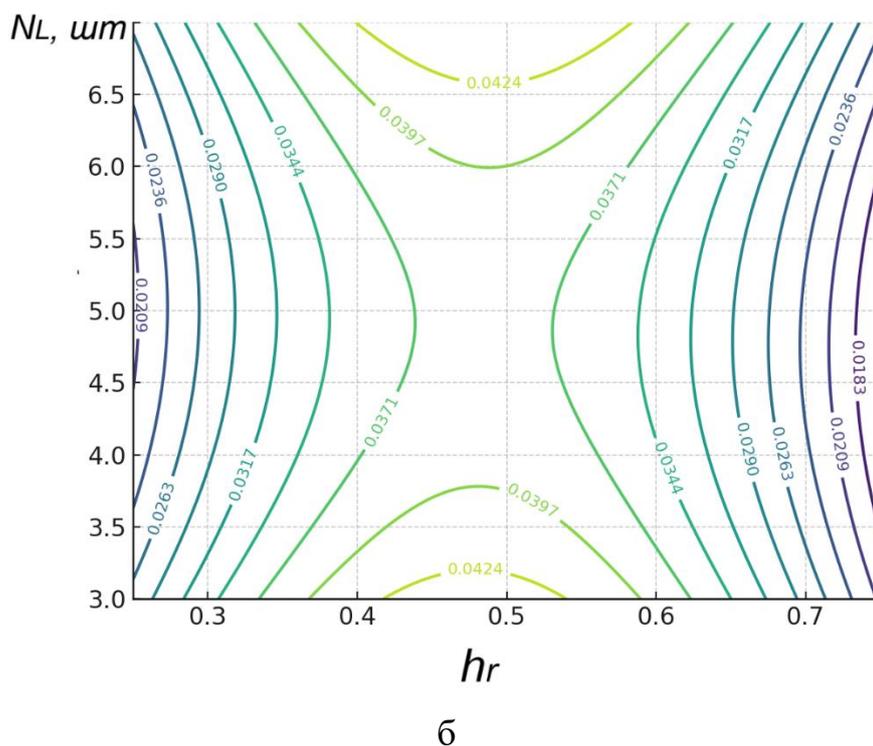
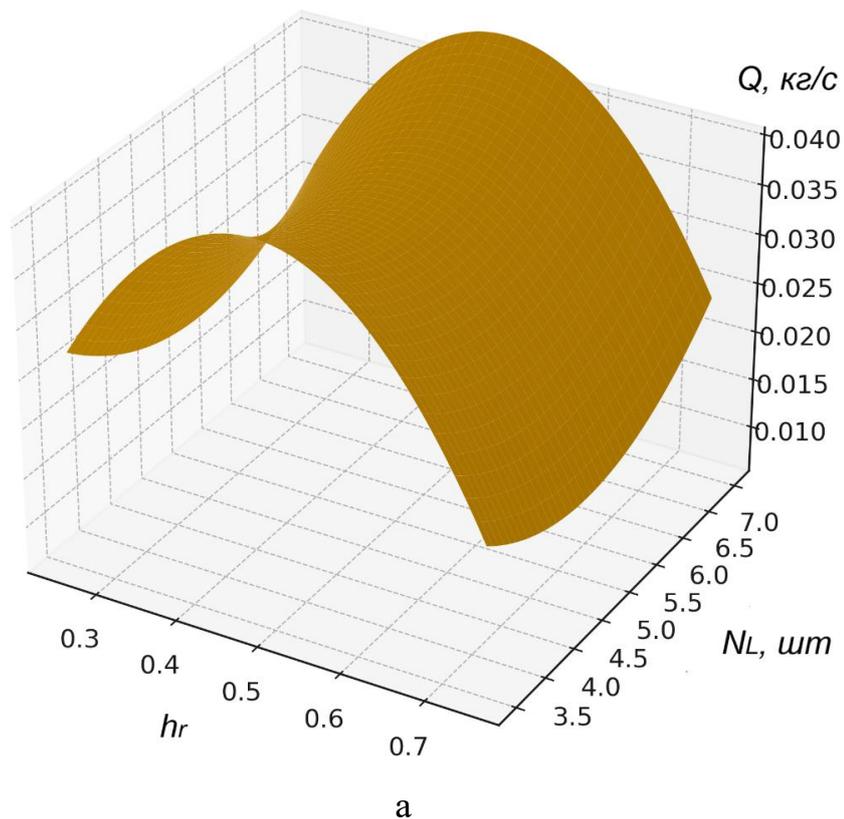


Рисунок Д.1 – Поверхня відгуку (а) і її двомірний перетин (б), що характеризує ефективність процесу сепарування СЗМ на дослідній ППП при $x_3=0$

Важливе практичне значення при роботі сепарувального обладнання з ППП

має місце двомірний перетин поверхні відгуку, який характеризує продуктивність в залежності від відносної висоти ОЕ (h_r) і коефіцієнту проникнення ППП (ε).

Для побудови цього перетину підставляємо значення $x_2=0$ в рівняння (Д.15), та маємо:

$$y = 0,03767 - 0,00235 x_1 - 0,00170 x_3 - 0,019613 x_1^2 - 0,007912 x_3^2. \quad (\text{Д.20})$$

Після розв'язку системи диференціальних рівнянь відносно невідомих, визначені координати центру поверхні відгуку: $x_{1s}=0,0599$; $x_{3s}=0,1074$.

Підставляючи значення x_{1s} в x_{3s} в (Д.20), отримали значення ефективності сепарування: $Q=0,03783$ кг/с.

Власними коренями характеристичного рівняння будуть: $V_{11}=-0,019613$, $V_{33}=-0,007912$, а саме рівняння в канонічній формі прийме вигляд:

$$Y - 0,03783 = - 0,019613 x_1^2 - 0,007912 x_3^2. \quad (\text{Д.21})$$

Кут повороту вісей координат в центрі поверхні відгуку для даного випадку дорівнює $\alpha=0,1^\circ$.

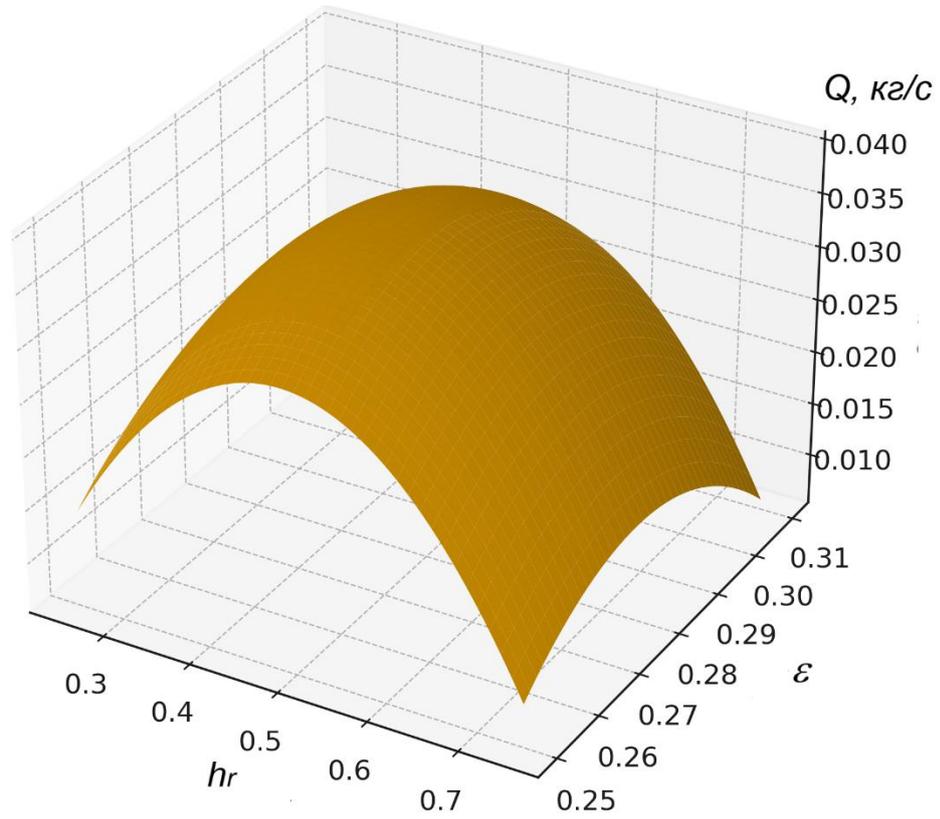
Аналогічним чином будували графічні залежності поверхні відгуку і її двомірний перетин за рівнянням (Д.21) при $x_2=0$ (рис.Д.2).

З рис.Д.2 виходить, що максимальне значення продуктивності ППП в перетині поверхні відгуку дорівнює $Q=0,03783$ кг/с і має місце при відносній висоті ОЕ $h_r=0,485$ і коефіцієнту проникнення $\varepsilon=0,277$. Аналізом рисунка встановлено, що допустимі значення факторів (при допустимому значенні продуктивності ППП) знаходиться в діапазонах $h_r=0,46\dots 0,51$ і $\varepsilon=0,27\dots 0,285$.

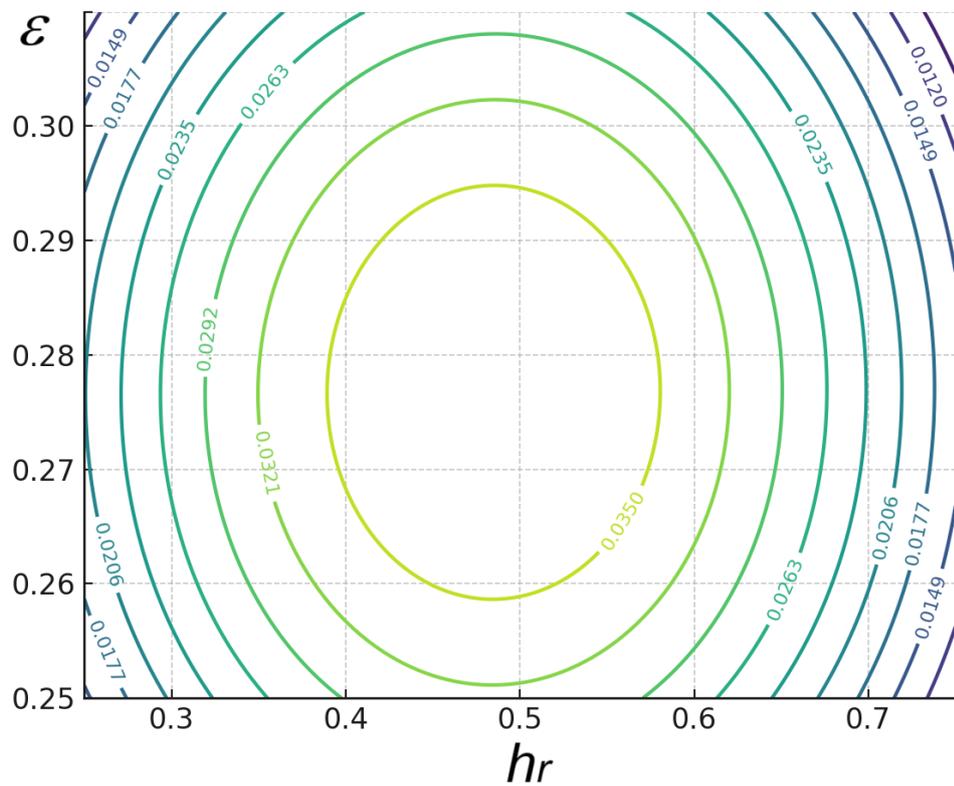
При розгляді двомірного перетину поверхні відгуку за рівнянням регресії відносно факторів: кількості підшарів СЗМ (N_L) і коефіцієнту проникнення (ε), фактор - відносну висоту ОЕ x_1 фіксували на нульовому рівні.

В результаті розрахунків отримано наступне рівняння:

$$y = 0,03767 + 0,00082 x_2 - 0,00170 x_3 + 0,00138 x_2 x_3 + \\ + 0,006621 x_2^2 - 0,007912 x_3^2. \quad (\text{Д.22})$$



а



Розв'язуємо систему диференціальних рівнянь, що представляють частинні похідні за кожним із двох факторів:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0,00082 + 0,00138x_3 + 2 \times 0,006621x_2 = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = -0,0017 + 0,00138x_2 + 2 \times (-0,007912)x_3 = 0, \end{cases} \quad (\text{Д.23})$$

Після розв'язку системи диференціальних рівнянь (Д.23) відносно невідомих, визначені координати центру поверхні відгуку: $x_{2s}=-0,05027$; $x_{3s}=-0,11182$. Значення продуктивності ППП в центрі поверхні відгуку дорівнює $Q=0,037744$ кг/с.

Власними коренями (Д.24) будуть $B_{22}=-0,007945$ і $B_{33}=0,006654$, а рівняння в канонічній формі запишеться в наступному вигляді:

$$Y - 0,03774 = -0,007945 x_2^2 + 0,006654 x_3^2. \quad (\text{Д.24})$$

Кут повороту вісей координат в центрі поверхні відгуку для даного випадку дорівнює $\alpha=2,71^\circ$.

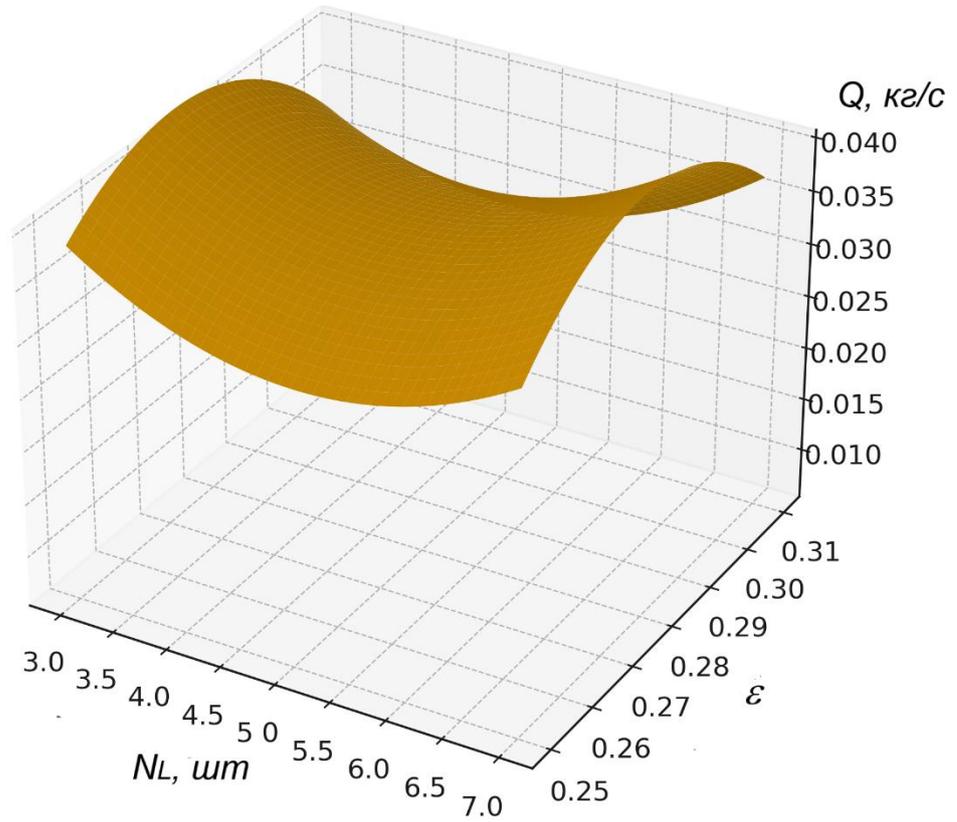
Аналогічним чином побудовано поверхні відгуку і їх двомірні перетини за рівнянням (В.25) при $x_1=0$ (рис.Д.3).

Аналізом рис.В.3 встановлено, що спільна взаємодія факторів, що досліджуються (x_2 – кількості підшарів СЗМ і x_3 – коефіцієнту проникнення) в області експерименту маємо екстремум за показником продуктивності ППП в точці з $Q=0,03774$ кг/с. При цьому величина факторів склала: кількості підшарів СЗМ $N_L=4,9$ штук і коефіцієнту проникнення $\varepsilon=0,277$.

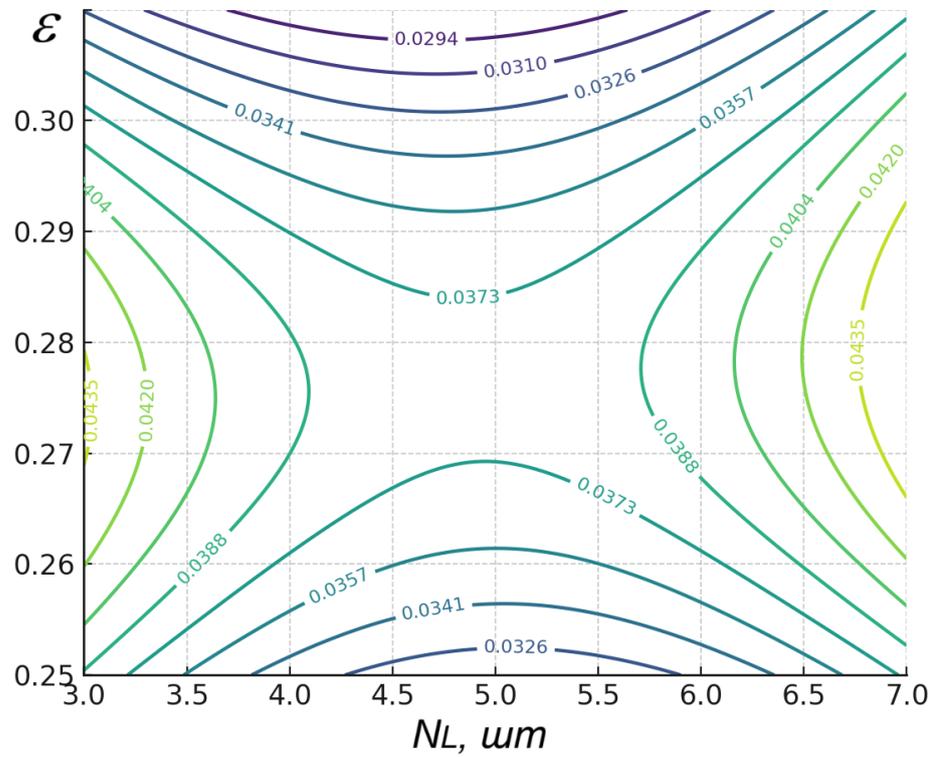
На підставі аналізу цього рисунку встановлено, що допустимі значення факторів знаходяться в межах $N_L=4,5-5,5$ штук і $\varepsilon=0,27-0,85$.

Аналізом залежностей (рис.Д.1 – Д.3) встановлені оптимальні співвідношення між параметрами сепарувального обладнання з дослідною ППП об'ємної структури: відносної висоти ОЕ $h_r=0,46\dots0,51$; кількості підшарів СЗМ $N_L=4,5\dots5,5$ штук і коефіцієнту проникнення $\varepsilon=0,27\dots0,285$.

При цьому найбільша продуктивність ППП склала $Q=0,03 - 0,039$ кг/с.



а



б

Рисунок Д.3 – Поверхні відгуку (а) і їх двомірний перетин (б), що характеризує продуктивність ППП при $x_1=0$

ДОДАТОК Е
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ, УГОДА, ПАТЕНТИ

«Затверджую»

Проректор з наукової та
міжнародної діяльності
Сумського національного
аграрного університету



Ю.І. Данько
(ПБ)
2024 р.

«Затверджую»

Генеральний директор
ПраТ ХАРКІВПРОДМАШ



О.В. Мащенко
(ПБ)
2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів роботи за договором про творчу співпрацю
№ 1 від 26.08. 2024 р.

Дійсним актом підтверджується, що результати спільної науково-дослідної роботи СНАУ та ПраТ ХАРКІВПРОДМАШ на тему «Обґрунтування параметрів процесу сепарування сипких середовищ на решетах з об'ємною структурою» (виконавші проф. Харченко С.О., аспірант Стельмах А.М.) у вигляді закінченої методики передані та запроваджені при виробництві решет для зерноочисних машин на Приватному акціонерному товаристві ХАРКІВПРОДМАШ.

Спільна виробнича перевірка модернізованого сепаратору Buhler TAS 206A-5 з решетами з об'ємною структурою, яка відбулася на ТОВ «Ханзе Агрі» (сmt. Степанівка, Сумська обл.), довела підвищення ефективності їх роботи на 24...30%.

Розроблені решета з об'ємною структурою та з обґрунтованими раціональними параметрами впроваджені у виробництво та можуть бути виготовлені під замовлення.

Річний економічний ефект від впровадження результатів роботи у серійне виробництво розроблених решет складає 126 тис. грн при їх щорічній програмі випуску в 100 штук.

Від СНАУ

Аспірант кафедри
агроінженерингу
Стельмах А.М.

Науковий керівник теми:
Професор кафедри
агроінженерингу
Харченко С.О.

Від

ПраТ ХАРКІВПРОДМАШ

Конструктор
Веклич А.

Генеральний директор

Мащенко О.В.

УГОДА

про співробітництво та організацію взаємовідносин між
 _____ Приватним акціонерним товариством ХАРКІВПРОДМАШ
 та Сумським національним аграрним університетом

м. Суми

„16” 08 2024 р.

Сумський національний аграрний університет (надалі іменується "Сторона 1") в особі ректора Коваленка Ігора Миколайовича, що діє на підставі Статуту, з одного боку, та ПраТ ХАРКІВПРОДМАШ _____ (надалі іменується "Сторона 2") в особі генерального директора Машенко Олександра Володимировича, що діє на підставі Статуту, з другого боку (надалі разом іменуються "СТОРОНИ", а кожний окремо іменується "СТОРОНА"), уклали цю Угоду про співробітництво та організацію взаємовідносин (надалі іменується "Угода") про таке:

1. СТОРОНИ цієї Угодою підтверджують, що інтересам кожної з них відповідає спільна і погоджена реалізація СТОРОНАМИ проектів у сфері науково-технічної діяльності, об'єднання зусиль задля створення нових видів знань, техніки й прогресивних технологій.

2. СТОРОНИ зобов'язуються спільно діяти на засадах взаємовідносин для досягнення спільних господарських цілей у відповідності до статутних завдань та економічних інтересів кожної із СТОРИН цієї Угоди.

3. У процесі виконання намічених спільних цілей СТОРОНИ прагнутимуть будувати свої взаємовідносини на підставі рівності, чесного партнерства та захисту інтересів один одного.

4. У випадку необхідності СТОРОНИ виконуватимуть взаємне фінансування спільних проектів на безоплатній та безпроцентній основі. Для цієї мети кошти будуть акумулюватися на рахунку однієї із СТОРИН; розмір, сума та порядок їх використання будуть визначені окремою угодою СТОРИН.

5. Для якнайшвидшого досягнення цілей за цією Угодою СТОРОНИ зобов'язуються обмінюватися наявною у їхньому розпорядженні інформацією з аспектів взаємного інтересу, проводити спільні консультації і семінари, встановлювати науково-технічні та комерційно-фінансові зв'язки з третіми особами й інформувати один одного про результати подібних контактів.

6. Конкретні форми та розміри участі СТОРИН у здійсненні спільних проектів будуть визначатися окремими договорами Сторін.

7. Ця Угода є передумовою і підставою для укладання, якщо СТОРОНИ визнають за необхідне, конкретних договорів на проведення науково-дослідних робіт.

8. Цю угоду укладено терміном на 5 років.

Угода набуває чинності з моменту її підписання й діє до
 „16” 08 2024 р.

9. Угоду складено у двох оригінальних примірниках, по одному для кожної із СТОРІН.

10. Зміни до цієї Угоди можуть бути внесені за взаємною згодою Сторін, що оформляється додатковою угодою до цієї Угоди.

11. Зміни та доповнення, додаткові угоди та додатки до цієї Угоди є її невід'ємною частиною, викладаються у письмовій формі та підписуються уповноваженими на те представниками Сторін.

12. СТОРОНИ зобов'язуються при виконанні цієї Угоди не зводити співробітництво до дотримання лише наявних у ній вимог, підтримувати ділові контакти та вживати всіх необхідних заходів для забезпечення ефективності та розвитку їх комерційних зв'язків.

Місцезнаходження та реквізити Сторін

Сторона 1

Сумський НАУ
40021, м. Суми,
вул. Г.Кондратьєва, 160,
код СДРПОУ 04718013

Телефон: (0542) 78-74-22

Ректор Сумського НАУ

І.М. Коваленко



Сторона 2

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
ХАРКІВПРОДМАШ
Адреса: Україна, 61001, Харківська обл., місто
Харків, вул. Лодзька, буд. 7
Код СДРПОУ 30034636
Телефон: +380577585355, +380577178177

Генеральний директор

М.П.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та міжнародної
діяльності СНАУ, д.е.н., професор
Данько Ю.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор СТОВ «Промінь»
Коваленко С.М.



АКТ

про перевірку і випробування модернізованого сепаратора БСХ 100 у виробничих умовах

В результаті проведеної науково-дослідної роботи Стельмаха А.М., був модернізований БСХ 100 шляхом встановлення перфорованих просіювальних поверхонь об'ємної структури.

Виробнича перевірка проведена в умовах довготривалої експлуатації на СТОВ «Промінь» Сумського району, Сумської області протягом 2024-2025 рр. При проведенні випробувань модернізованим сепаратором проводилось очищення кукурудзи (3500 т), соняшнику (2300 т).

До програми випробувань входило встановлення технологічної ефективності сепарування зернових матеріалів на модернізованому сепараторі БСХ 100, перевірка надійності просіювальних поверхонь та функціональної стабільності.

В результаті випробувань модернізованого сепаратора встановлено:

- збільшення продуктивності обладнання на 35-30% при очищенні зерна кукурудзи та на 20-25% – соняшнику;
- поліпшення довговічності ППП на 55-60% при очищенні зерна кукурудзи та на 35-40% - соняшнику;
- відсутність відмов та технологічних збоїв.

Загальний річний економічний ефект від застосування модернізованого сепаратора БСХ 100 з розробленими просіювальними поверхнями об'ємної структури за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав 108,5 тис.грн.

Від СНАУ

Від СТОВ «Промінь»

Науковий керівник, д.т.н., доцент

Головний інженер

Харченко С.О.

Коваленко В.С.

Відповідальний виконавець, аспірант

Стельмах А.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та міжнародної
діяльності СНАУ, д.е.н., професор
Данько Ю.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТДВ «Племзавод «Михайлівка»
Зеленський М.О.



АКТ

**про виробничу перевірку і випробування розроблених перфорованих
просіювальних поверхонь об'ємної структури**

Відповідно до програми спільної науково-дослідної роботи між СНАУ та ТДВ «Племзавод «Михайлівка» було випробувано перфоровані просіювальні поверхні з об'ємними елементами згідно з результатами досліджень аспіранта Стельмаха А.М.

На ТДВ «Племзавод «Михайлівка» (с. Андріївське Сумського району Сумської області) в умовах довготривалої експлуатації на протяжні 2024-2025 рр. були проведені виробничі випробування.

До програми випробувань входило встановлення ефективності сепарування зернових матеріалів кукурудзи та соняшнику на модернізованому сепараторі Петкус К-527 з розробленими перфорованими просіювальними поверхнями з об'ємними елементами, визначення показників надійності, техніко-економічних показників роботи сепаратора.

При проведенні випробувань проводилось очищення кукурудзи сорту «Майфлауер», соняшнику сорту «Толето». Загальний об'єм обробленого зерна за період випробувань склав: 4200 т. – кукурудзи, 1700 т. – соняшнику.

В результаті випробувань модернізованого сепаратора встановлено:

- збільшення ефективності сепарування зернових матеріалів на 20-30%.
- зниження швидкості зношення розробленої просіювальної поверхні та підвищення її ресурсу на 30-40%;
- відсутність відмов та технологічних збоїв.

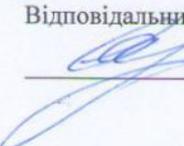
Річний економічний ефект від застосування модернізованого сепаратора Петкус К-527 з розробленими перфорованими просіювальними поверхнями об'ємної структури за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав на сепаруванні зернових матеріалів соняшнику – 7,5 тис. грн., кукурудзи – 86,1 тис. грн.

Від СНАУ

Науковий керівник, д.т.н., доцент

 Харченко С.О.

Відповідальний виконавець, аспірант

 Стельмах А.М.

Від ТДВ «Племзавод «Михайлівка»

Директор

 Зеленський М.О.





