

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ПОПОЛОВ ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК [669.162.24:621.928.23](043)

РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ
ВІБРАЦІЙНО-УДАРНИХ МАШИН ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО
ВИРОБНИЦТВА

Спеціальність: 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Державному університеті економіки і технологій Міністерства освіти і науки України, м. Кривий Ріг

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шевченко Олександр Іванович

старший науковий співробітник відділу геомеханічних
основ технологій відкритої розробки родовищ
Інституту геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова
Національної академії наук України

доктор технічних наук, професор

Іщенко Анатолій Олексійович

професор кафедри підйомно-транспортних машин і
деталей машин Приазовського державного технічного
університету

доктор технічних наук, старший дослідник

Баюл Костянтин Васильович

старший науковий співробітник відділу технологічного
обладнання та систем управління Інституту чорної
металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії на-
ук України

Захист дисертації відбудеться **08 жовтня 2025 р** об **11.00** годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 08.084.03 при Українському державному університеті науки і технологій за адресою: пр. Науки, 4, м. Дніпро, Україна, 49600.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Українського державного університету науки і технологій за адресою: пр. Науки, 4, м. Дніпро, Україна, 49600, та на сторінці спеціалізованої Вченої ради за адресою: <https://ipbt.ust.edu.ua/ua/mscience/i10/p1556>

Автореферат розісланий **06 вересня 2025 р.**

Вчений секретар спеціалізованої

Вченої ради Д 08.084.03

доктор технічних наук, професор

lydmila_kamkina@ukr.net

Людмила КАМКІНА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день металургійна галузь України перебуває у вкрай складному становищі. Обсяги виробництва у період воєнного стану знизилися більш ніж у п'ять разів порівняно з довоєнним рівнем. Однак із завершенням війни та перемогою України відкриваються можливості для відродження національної промисловості, зокрема металургії. Одним із ключових напрямів відновлення галузі стане модернізація енергоємних переділів, що сприятиме зниженню собівартості готової продукції та підвищенню її конкурентоспроможності на світовому ринку.

Аналіз калькуляцій собівартості свідчить, що найбільш витратним на сьогодні є коксо-доменне виробництво. Ефективність цього переділу значною мірою залежить від якості підготовки шихтових матеріалів до процесів спікання та плавки. Основним методом підготовки металургійної шихти є її фракціонування за допомогою грохотів різних типів і конструкцій. Ці пристрої відрізняються за площею та конструктивними особливостями сита, динамічними параметрами, а також іншими характеристиками, що зумовлюють їх ефективність у конкретних технологічних процесах. Основним завданням зазначеного технологічного обладнання є зменшення вмісту некондиційної фракції в металургійній шихті. Для коксу така фракція становить — менше ніж 25 мм, а для залізовмісної частини (агломерат і окотиші) — менше 5 мм. Ефективне вилучення цих класів має вирішальний вплив на енергоємність доменного виробництва.

Однак, забезпечення належного рівня ефективності грохочення за цими класами є складним завданням. На сьогодні ефективність розсіву на існуючих вібраційних грохотах не перевищує 50 %, що є недостатнім для задоволення вимог до якості підготовки шихти перед процесами спікання та плавки. Основною причиною зниження ефективності грохочення є захаращення та забиваність отворів сіячої поверхні важкопрохідними частинками, що зменшує її живий перетин та знижує якість класифікації матеріалу.

Це свідчить про необхідність впровадження нових технічних рішень, спрямованих на підвищення динамічної активності сіячих поверхонь, їх здатності до самоочищення та стабілізації гранулометричного складу оброблюваного матеріалу шляхом реалізації вібраційно-ударної дії. Ідеї та технічні рішення щодо створення динамічно-активних сіячих поверхонь розглядалися як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями, проте переважна більшість із них була зосереджена на застосуванні їх в грохотах для рудних і будівельних матеріалів. У контексті обробки залізовмісної та паливної частини металургійної шихти ці дослідження залишаються недостатньо вивченими, часто мають випадковий характер і не мають наукового обґрунтування.

Таким чином, відповідно до викладеного, вирішення проблеми підвищення якості підготовки металургійних шихтових матеріалів до спікання і плавки на основі нових науково-обґрунтованих технічних рішень по створенню вібраційних грохотів з вібраційно-ударною дією їх сіячих поверхонь є актуальним і важливим на сьогоднішні завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з напрямом наукової діяльності кафедри інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій, а саме розробкою та удосконаленням вібраційної техніки для підприємств гірничо-металургійного комплексу, що відповідає абзацу другому статті 2 Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності», який стосується формуванню ефективного сектору наукових досліджень і науково-технічних розробок для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняного виробництва і його сталого розвитку.

Окремі розділи даного дослідження виконано в рамках прикладних науково-дослідних тем, так частка розділів даної роботи входили до складу прикладних держбюджетних та інших науково-дослідних тем, а саме: № 0117U002346 «Розробка новітніх технологій використання техногенних відходів на основі заліза та марганцю для ресурсозаощадження та покращення екологічного стану Придніпров'я», виконувалась в Національній металургійній академії України; № 0120U101148 «Розроблення екологічно прийнятних технологій поводження з відходами гірничорудної та металургійної промисловості», виконувалась в Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління; № 0124U004580 «Аналітичні дослідження стану сіячої поверхні в умовах вібраційно-ударної дії», виконувалась в Державному університеті економіки і технологій.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка наукових основ створення вібраційних машин, що реалізують вібраційно-ударну дію на оброблюваний шар шихти, з урахуванням впливу конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів їх робочого органу на технологічні показники, що забезпечують підвищення якості фракціонування металургійної шихти перед процесами спікання та плавкою.

Для досягнення поставленої мети, на підставі аналізу стану питання, необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель, що описує динамічний стан системи, де генератором вібраційно-ударних навантажень є сіяча поверхня, за рахунок невідтворюваного зв'язку між ситом і коробом, з урахуванням впливу технологічного навантаження та параметрів самосинхронізуючого інерційного приводу;
- використовуючи енергетичний метод аналізу встановити як геометричні розміри сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі швелероподібного підсилювача впливають на її потенційну та кінетичну енергію при динамічне стійких лінійно направлених коливаннях коробу грохота;
- узагальнити результати проведених досліджень, на основі яких побудувати математичну модель процесу очищення сіячої поверхні, та виконати аналіз умов, що визначаються зусиллям, які діють на частинку матеріалу, її розмірами та граничною висотою їх підкидання, за яких унеможливується заклинювання в отворах сита;

- розробити математичну модель процесу руху частинок матеріалу, що розсіюється на сіячій поверхні, вільно укладеній у просторі швелероподібного підситника коробу грохота;
- експериментально дослідити процеси, що протікають в шарі шихти при грохоченні на машинах, що реалізують вібраційно-ударний режим;
- провести експериментальні дослідження та встановити залежність основних технологічних параметрів грохочення для вібраційно-ударних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею від режимів коливань коробу грохота;
- дослідити стабілізацію механічної властивості металургійної шихти в процесі її грохочення на машинах, що реалізують вібраційно-ударний режим;
- на основі математичних моделей розробити методику розрахунку зношування вільно укладеної сіячої поверхні за умов дії на неї вібраційно-ударних навантажень;
- виконати аналітичні дослідження віброізолюючих опор, що працюють під дією вібраційно-ударних навантажень;
- провести промислові випробування грохотів, здатних реалізувати вібраційно-ударний режим за допомогою вільно укладеної сіячої поверхні, та встановити її вплив на основні показники грохочення металургійної шихти;
- виконати експериментальним шляхом перевірку достовірності отриманих результатів досліджень і визначити раціональні кінематичні і динамічні параметри вібраційно-ударних машин, які б відповідали необхідним технологічним вимогам ділянок підготовки шихти перед спіканням і плавкою;
- впровадити в навчальний процес отриманні теоретичні та експериментальні дані при викладанні фахових освітніх компонент підчас підготовки здобувачів освіти третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Машинобудування» спеціальності G11 Машинобудування (за спеціалізаціями) галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво.

Об'єкт дослідження. Вібраційні машини, що реалізують вібраційно-ударну дію під час фракціонування металургійної шихти перед процесами спікання та плавки.

Предмет дослідження. Конструктивні, кінематичні та динамічні параметри сіячої поверхні з невідстримним зв'язком між ситом і коробом вібраційної машини та їх вплив на основні технологічні показники при відсіві некондиційної частини металургійної шихти перед спіканням і плавкою.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань було використано сучасний комплексний підхід до досліджень: для аналізу впливу якості підготовки шихтових матеріалів на металургійні процеси спікання та плавки з метою визначення наукової проблематики використовувались метод експертного оцінювання та Дельфі; теоретичні дослідження стану сіячої поверхні в умовах вібраційно-ударної дії здійснювалися на основі фундаментальних положень динаміки твердого тіла та теорії коливань динамічних систем; процесів самоочищення вільно укладеної сіячої поверхні та стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти, що на ній розсівається, базувались на геометричному аналізі, механіки контактної взаємодії,

теорії пружності, механіки руйнування та динаміки деформованих тіл; при розробці математичної моделі прогнозування зносу та оцінки строку експлуатації сіячої поверхні застосовувались основні методи теорії тертя та зношування; в експериментальній частині роботи застосовувались методи планування експерименту, стандартні засоби віброметрії та хронометражу; методи математичної статистики використані при обробці та аналізі результатів експериментальних та розрахунково-аналітичних досліджень. Достовірність отриманих результатів підтверджена як лабораторними, так і промисловими дослідженнями.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше встановлено, що сталість коливань сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, досягається при відношенні розміру проміжку між нижньою та верхньою площинами підситника до максимальної амплітуди коливань її матеріальної точки меншим за одиницю, а при збільшенні частоти коливань коробу час етапу її несталого руху зменшується за степеневим законом, що теоретично обґрунтовано на підставі розробленої математичної моделі, враховуючи конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також геометричні характеристики, механічні властивості матеріалу самої сіячої поверхні, яка підтверджена експериментально-практичними дослідженнями.

2. Розвинені теоретичні уявлення щодо характеристик динамічних залежностей вільно укладеної сіячої поверхні вібраційного грохоту, встановлено, що при наближенні значень власної частоти її пружних коливань до вимушених, їх характер приймає квазігармонійний вид, а при збільшенні кута вібрації точок коробу від 40° до 50° середня амплітуда коливань матеріальної точки сіячої поверхні зменшується за поліноміальним законом другого порядку.

3. Вперше встановлено, що геометричні розміри сіячої поверхні є незалежним фактором, який впливає на потенційну та кінетичну енергії для обох форм деформації поступального і обертального рухів, а поворотне-обертальний є переважальним режимом її роботи при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях коробу.

4. Вперше отримано практично підтверджену аналітичну залежність, яка визначає розмір частинки матеріалу, більше якої заклинювання не відбувається, в залежності від апертури сіячої поверхні, її фізичних властивостей та виду матеріалу, що розсівається, на основі якої встановлено, що в отворі сита здатні заклинюватись частинки, розмір яких в $1 \dots 1,4$ рази більше розміру отвору, причому більше значення відповідає максимальному значенню коефіцієнта тертя.

5. Вперше отримані експериментально підтверджені теоретичні залежності, які визначають силу заклинювання частинки, а також граничну висоту її підкидання, більше якої не відбувається її заклинювання в отворі сита та з'ясовано, що в залежності від апертури сіячої поверхні її фізичних властивостей та матеріалу, який розсівається, мінімально необхідна висота підкидання частинки зі збільшенням коефіцієнту тертя зменшується, а сама залежність описується степеневою функцією.

6. Вперше теоретично обґрунтовано умови евакуації частинки матеріалу, що заклинилися, з отворів сіячої поверхні вільно укладеної в просторі підситника віброуючого коробу з урахуванням фізичних властивостей матеріалу, що розсівається,

апертури сита, його конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів, на підставі практично підтвердженої математичної моделі процесу очищення сіячої поверхні.

7. Вперше розроблено математичну модель, яка описує процес руху частинки матеріалу, що розсівається, по сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, та встановлено, що зі збільшенням прискорення коливань коробу грохоту середня швидкість руху та її прискорення на початковому етапі, як і середня висота підкидання та період її вільного руху на другому етапі, збільшуються.

8. Теоретичне обґрунтовано та експериментально підтверджено, що необхідна ефективність процесу стабілізації гранулометричного складу агломерату та механічної міцності частинок надрешітного продукту фракцією 5...40 мм шляхом їх руйнування по концентраторах напруження на сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, досягається за умови прискорення його коливань в межах від 32,9 до 47,3 м/с² при сталій амплітуді $A = 0,003$ м.

9. В розвиток теорії процесів грохочення експериментальним шляхом отримано залежності технологічних параметрів вібраційно-ударних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею від режимів коливань коробу, встановлено інтенсифікацію кожного з досліджуваних режимів порівняно з традиційною конструкцією, у якій сито жорстко закріплене до коробу грохота.

10. В розвиток триботехніки розроблено математичну модель прогнозування зносу та оцінки ресурсу експлуатації сіячої поверхні, виготовленої з полімерного матеріалу, що функціонує в умовах металургійного виробництва.

Практичне значення отриманих результатів. Використання отриманих результатів дозволило:

- розробити методику розрахунку конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів вібраційних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею, розміщеною у просторі, утвореному її швелероподібним підситником;
- розробити методику розрахунку параметрів вібраційно-ударного режиму, необхідних для стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти перед завантаженням її до доменної печі;
- визначити горизонтальну жорсткість пружинних елементів із витками круглого та прямокутного перерізів для вібраційних машин, що генерують вібраційно-ударні коливання;
- розробити методику розрахунку, яка дозволяє обґрунтовано вибирати гвинтові циліндричні пружини стискання для вібраційних машин з урахуванням зсуву їх опорних витків;
- запропонувати конструкцію та методику розрахунку гумове-пружного амортизатора стискання-зсуву з рівними жорсткостями, який забезпечує підвищену надійність та працездатність вібраційних машин, що працюють у режимі вібраційно-ударних навантажень;
- запропонувати нові технічні рішення, які дозволяють інтенсифікувати процес підготовки металургійних шихтових матеріалів фракціонуванням перед спіканням та плавкою.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною роботою автора, яка базується на теоретичних та експериментальних дослідженнях, виконаних особисто дисертантом. Автор приймав безпосередню участь у визначенні завдань та мети роботи, у виконанні теоретичних та експериментальних досліджень та обробці результатів. Основні наукові положення, що отримані автором і опубліковані в статтях та доповідях, виконані дисертантом самостійно або в співавторстві. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належить наступне: розробка методу досліджень впливу гранулометричного складу вугільної шихти на енерговитрати дробарки, впливу конструктивних факторів на показники віброактивності та зносостійкості сіячої поверхні, планування лабораторних досліджень [1]; узагальнення інформації про конструкцію та досвід експлуатації вібраційних грохотів [2, 13, 24, 26]; розробка розділів: «Обладнання для дроблення, сушки та помелу добавок», «Обладнання для дозування компонентів шихти», «Обладнання для класифікації матеріалів за крупністю» [3]; розробка математичної моделі [4, 5, 9, 12, 17, 19, 20, 21, 30, 31, 32]; дослідження роботи грохоту з вільно укладеною сіячою поверхнею [6, 8]; формулювання основних положень застосування віброударного обладнання [7, 27]; розробка методики розрахунку гвинтових циліндричних пружин [10, 25]; розробка методики проведення лабораторних досліджень, обробка отриманих результатів [11, 14, 15, 22, 28]; аналіз та узагальнення інформації щодо напрямків вдосконалення вібраційних грохотів, розробка конструкції грохоту з вільно укладеною сіячою поверхнею [16]; реалізація методу експертного оцінювання, аналіз гранулометричного складу [18, 23, 29]; розробка удосконалених конструктивних рішень вібраційно-ударних грохотів [33, 34]; розробка конструкції [35]; розробка удосконалених конструктивних рішень вібраційних машин [36, 37, 38, 39].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи викладені у формі доповідей на 10 науково-практичних конференціях, у тому числі на: XIII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2017); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин — основна складова прикладної механіки», яка присвячена 110-річчю з дня народження чл.-кор. АН України, проф., д.т.н. Кожевнікова С. М. (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2017); XIV Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2018); Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність і динаміка важких машин», яка присвячена 80-річчю академіка НАН України Большакова В. І. (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2018); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Потураївські читання», яка присвячена 99-й річниці з дня народження академіка НАН України Потураєва В.П. (Дніпровська політехніка, Дніпро, України, 2021); V Міжнародному науковому конгресі «Society of ambient intelligence 2022» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2022); VI Міжнародному науковому конгресі «Society of ambient intelligence 2023» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2023); VII Міжнародному науковому конгресі «Society of ambient intelligence 2024» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2024); XVIII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2024); VII Міжнародній конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Аалто, Гельсінкі, Фінляндія, 2024).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 39 наукових робіт, у тому числі: 3 монографії; 6 публікацій, що входять до міжнародної науково-метричної бази Scopus; 13 статей у спеціальних наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України; 10 тез та матеріалів доповідей на наукових конференціях; 7 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Робота має загальний обсяг 330 сторінки, містить додатків на 39 сторінках, 106 ілюстрацій, 8 таблиць. Список використаних джерел складається з 330 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначений зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету досліджень та перелік задач для її досягнення, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Розкрито наукову новизну отриманих результатів та практичне їх значення. Зазначений особистий внесок здобувача, наведено данні щодо апробації матеріалів дисертації, публікації результатів дослідження, структури та обсягу дисертації.

У **першому розділі** виконано аналіз стану металургійної галузі, який показав, що наразі світова металургія виявляє ознаки так званої «Нової нормальності». Це не передбачає жодних масштабних подій, здатних спричинити стале зростання споживання металургійної продукції, а в цілому і галузі. За таких умов розвиток промисловості можливий за рахунок впровадження новітніх технологій, спрямованих на оптимізацію та зменшення операційних витрат.

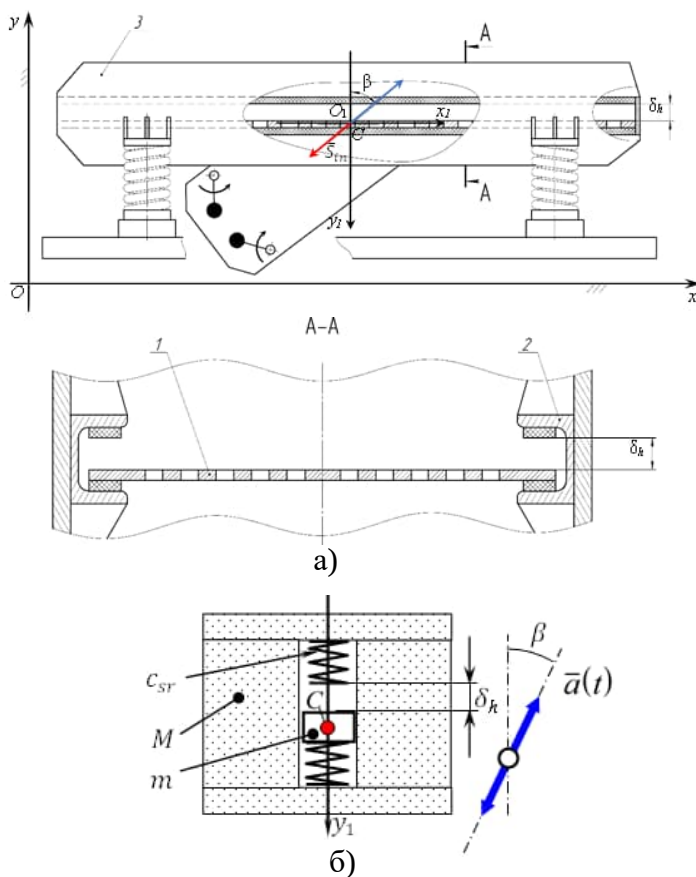
Зниження операційних витрат, враховуючи динаміку цін на електроенергію та природний газ, можливе за рахунок зменшення енергетичної складової у калькуляції собівартості готової продукції за найбільш енергоємними переділами металургійної галузі, з яких основним є доменне виробництво.

Методами експертного оцінювання та Дельфі встановлено, що істотний вплив на енергоємність доменного виробництва чинить вміст некондиційної фракції (<25 мм) у коксі та (<5 мм) у залізовмісній частині шихти, також було виявлено, що зі зменшенням розміру фракції вміст шкідливих елементів, таких як сірка для агломерату та зольність і волога для коксу, зростають. При транспортуванні залізовмісної та паливної частин металургійної шихти по тракту шихтоподачі доменної печі відбувається постійне нарощування некондиційних фракцій, виділення яких на існуючих грохотах не вирішує задачу суттєвого зниження вмісту дріб'язку в скіповій шихті.

На підставі вивчення конструктивних, динамічних і технологічних показників вібраційних машин, що застосовуються в гірничо-металургійній галузі виявлено, що існуючі технологічні лінії підготовки металургійної шихти до спікання та плавки потребують вібраційних грохотів зі збільшеною ефективністю грохочення, сіячі поверхні яких мають підвищену динамічну активність, здатні до самоочищення та стабілізації гранулометричного складу оброблюваного матеріалу шляхом ударно-імпульсної дії. Ідеї та технічні рішення щодо створення динамічно-активних сіячих

поверхонь розглядалися як вітчизняними науковцями, такими як Засельський В. Й., Учитель О. Д., Булат А. Ф., Надутий В. П., Лапшин Є. С., Шевченко О. І., Потураєв В. М., Франчука В. П., Швед С. В., Юдін А. В., Мальцев В. А., так і зарубіжними Chenlong Duan, Haishen Jiang, Leonid Slepryan, S. Abolfazl Zahedi, проте, всі дослідження були зосереджені на реалізації вібраційно-ударного режиму за умови закріпленої сіячої поверхні та застосуванні її в грохотах для рудних і будівельних матеріалів.

Оцінка ефективності запропонованих технічних рішень щодо створення вібраційно-ударних грохотів та вивчення підходів до визначення їх конструктивних, кінематичних і динамічних параметрів дозволив встановити, що грохот, який реалізує вібраційно-ударну дію на оброблювальний матеріал за рахунок вільно укладеної у обмеженому просторі сіячої поверхні, значно перевищує аналогічні експлуатаційні показники грохотів, що використовуються, але для таких вібраційних машин відсутні дослідження розрахунку їх технологічних, конструктивних, кінематичних, динамічних та міцнісних параметрів як машини в цілому, так і окремих їх вузлів.



1-сіяча поверхня; 2-швелероподібний підситник; 3-короб;

c_{sr} – усереднена жорсткість пружини;
 M – маса корпусу; m – маса сіячої поверхні;
 δ_h – проміжок, утворений підситником;
 β – кут вібрації; $\ddot{a}(t)$ – прискорення переміщення корпусу

Рис. 1. Розрахункова (а) та еквівалентна (б) схема

Таким чином, розробка наукових основ створення вібраційних машин, що реалізують вібраційно-ударну дію на оброблюваний шар шихти, з урахуванням впливу конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів їх робочого органу на технологічні показники, що забезпечують підвищення якості фракціонування металургійної шихти перед процесами спікання та плавкою, є актуальною науковою проблемою.

У другому розділі представлено результати теоретичних досліджень стану сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореному швелероподібним підситником, в умовах вібраційно-ударної дії. Для вивчення її руху були використані фундаментальні положення динаміки твердого тіла та теорії коливань динамічних систем, розроблена розрахункова схема (рис. 1), де усереднена жорсткість пружини c_{sr} (див. рис. 1, б), яка враховувала пружну деформацію сіячої поверхні, представлена у вигляді чисельності елементарних балок-смужок, що лежать в подовжньому та поперечному напрямках, мають защемлені кінці та знахо-

дяться в однорідному полі сил інерції.

Прийнята розрахункова схема обумовлює шість характерних етапів циклічного руху механічної системи, при гармонійних коливаннях коробу.

Підчас першого етапу відбувається спільний розгін елементів системи «сито-короб». Матеріальна точка спирається на пружну основу відомої жорсткості, а її рух вважається таким, що повністю підкорюється руху коробу. При цьому приймається, що маса коробу є переважаючою над масою матеріальної точки, тож зміною закону руху коробу при взаємодії з точкою можна знехтувати.

На другому етапі відбувається роздільний рух елементів системи до їх зіткнення. Етап протікає до появи одностороннього зв'язку з нижньою або верхньою площинами підситника.

На третьому етапі сіяча поверхня впирається у верхню опорну площину підситника та зупиняється. Частина сіячої поверхні, що не контактує з опорною площиною підситника продовжує рух у тому ж напрямку прогинаючись, в межах своєї пружності, досягаючи максимально можливої стрілу прогину. Після досягнення максимального прогину починається четвертий етап руху сіячої поверхні — її відскок від верхньої опорної площини підситника під дією сили пружності. При цьому опорна поверхня сита залишається нерухомою, переміщується лише розтягнуте тіло сіячої поверхні.

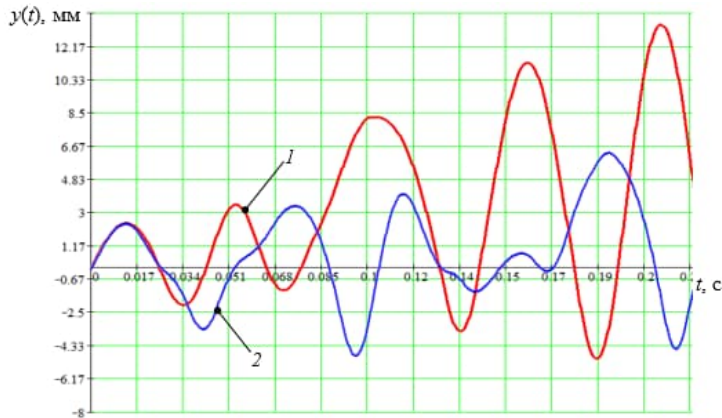
На п'ятому етапі після відриву матеріальної точки від контакту з верхньою опорною поверхнею швелероподібного підситника, вона рухається під дією сили тяжіння та тертя в абсолютній системі координат xu , а також під дією сил інерції в відносній системі координат x_1u_1 .

Підчас шостого етапу відбувається контакт опорної поверхні сита з нижньою опорною площиною швелероподібного підситника, ковзання опорної поверхні сита в просторі, утвореному підситником, припиняється, відбувається пружне стиснення елементів системи.

Рівняння відносного руху матеріальної точки на всіх етапах формують математичну модель, що описує рух сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, яка враховує конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також геометричні характеристики та механічні властивості матеріалу самої сіячої поверхні.

Для дослідження динамічного стану системи, використовуючи чисельні методи, був створений програмний продукт, який реалізовував алгоритм розрахунку базуючись на вищезазначеній математичній моделі. У всіх випадках визначалась траєкторія руху матеріальної точки сіячої поверхні, час її відриву та зіткнення з нижньою та верхньою площинами підситника.

На першому кроці проводилось моделювання двох вібраційних грохотів з вільно укладеною сіячою поверхнею з однаковими геометричними, кінематичними та динамічними параметрами, які відрізнялись один від одного тим, що простір, утворений швелероподібним підситником, в одному випадку, забезпечував можливість взаємодії сіячої поверхні з нижньою та верхньою площинами підситника, а в іншому лише з нижньою. Отримані результати наведені на рис. 2.



1 - сіяча поверхня взаємодіє з нижньою та верхньою площинами підситника
2 - сіяча поверхня взаємодіє з нижньою площиною підситника

Рис. 2. Траєкторія руху матеріальної точки сіячої поверхні

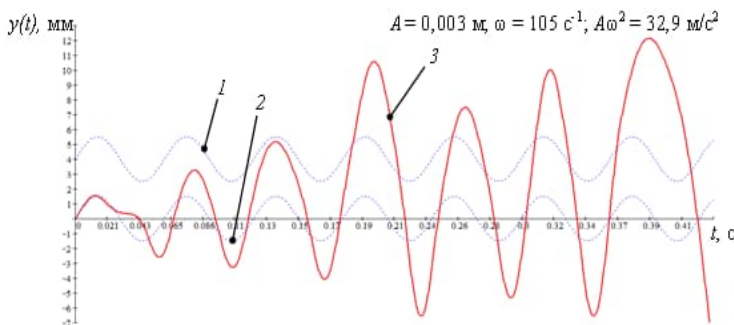


Рис. 3. Траєкторія руху матеріальної точки верхньої (1), нижньої (2) площини підситника та сіячої поверхні (3)

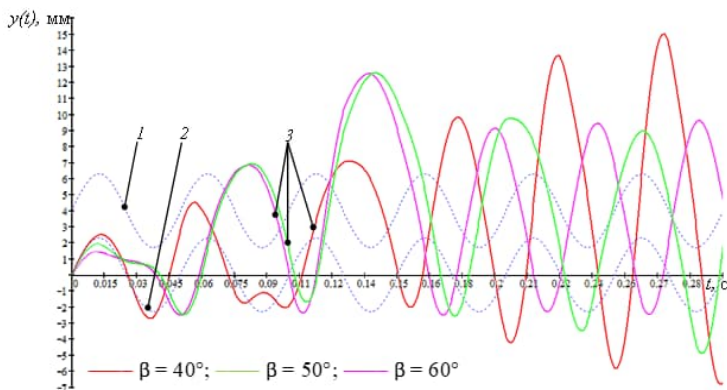


Рис. 4. Траєкторія руху матеріальної точки верхньої (1), нижньої (2) площини підситника та сіячої поверхні (3) в залежності від кута вібрації

На другому кроці моделювання проводились для чотирьох варіантів початкових даних, які відрізнялись кінематичними параметрами коробу. Відбувалось варіювання прискорення коливань в діапазоні від 18 до 47 м/с² за умови постійності амплітуди коливань $A = 0,003$ м та зміни кругових частот $\omega = 79; 94; 105; 126$ с⁻¹. Одна з характерних траєкторій наведена на рис. 3.

На третьому кроці вивчався вплив кута вібрації точок коробу β на траєкторію руху сіячої поверхні при сталих кінематичних та динамічних параметрах грохоту. Кут вібрації точок коробу дорівнював 40°, 50° та 60°, що відповідає діапазону кутів, які застосовуються на практиці. Отримані результати наведені на рис. 4.

Аналіз отриманих результатів дозволив вперше встановити, що сталість коливань сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, досягається при відношенні розміру проміжку між нижньою та верхньою площинами підситника до максимальної амплітуди коливань її матеріальної точки меншим за одиницю, а при збільшенні частоти коливань коробу час етапу її несталої руху зменшується за степеневим законом, що теоретично обґрунтовано на підставі розробленої математичної моделі, враховуючи конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також геометричні харак-

теристики, механічні властивості матеріалу самої сіячої поверхні. Також розвинені теоретичні уявлення щодо характеристик динамічних залежностей вільно укладеної сіячої поверхні вібраційного грохоту, встановлено, що при наближенні значень власної частоти пружних коливань сіячої поверхні до вимушених, їх характер приймає квазігармонійний вид, а при збільшенні кута вібрації точок коробу від 40° до 50° се-

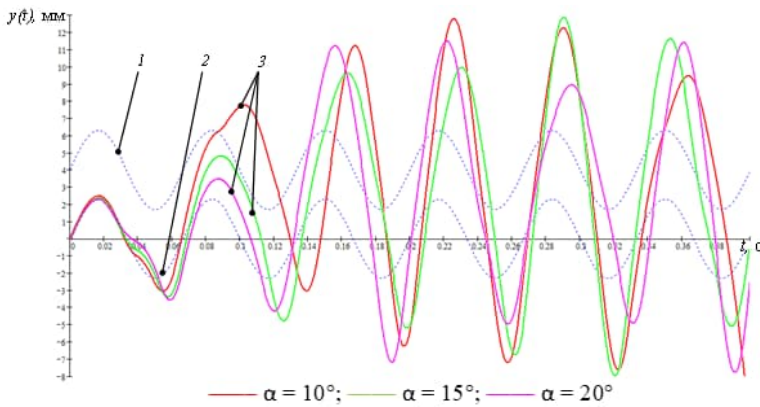


Рис. 5. Траєкторія руху матеріальної точки верхньої (1), нижньої (2) площини підситника та сіячої поверхні (3) в залежності від кута нахилу сіячої поверхні до горизонту α

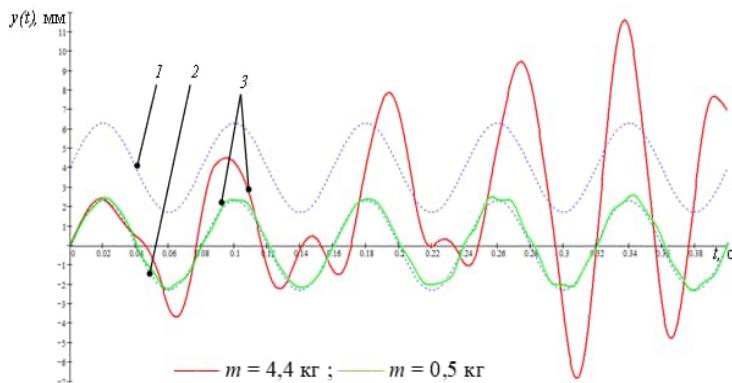


Рис. 6. Траєкторія руху матеріальної точки верхньої (1), нижньої (2) площини підситника та сіячої поверхні (3) в залежності від її маси

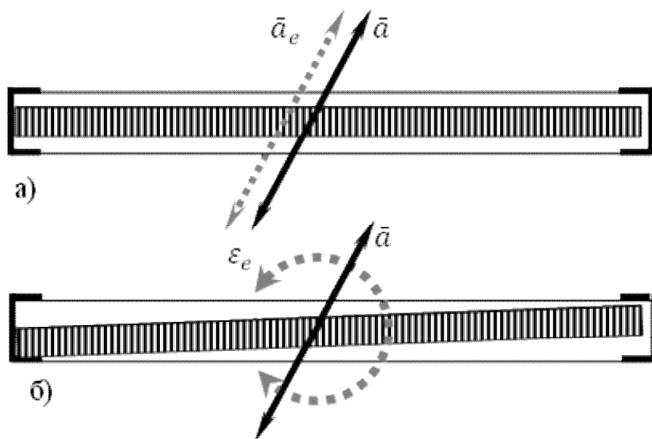


Рис. 7. Форми руху сіячої поверхні у вібраційному полі
а - зворотно-поступальний рух;
б - поворотне-обертальний рух

редня амплітуда коливань матеріальної точки сіячої поверхні зменшується за поліноміальним законом другого порядку.

На четвертому кроці досліджувався вплив кута нахилу сіячої поверхні до горизонту α , що дорівнював 10° ; 15° та 20° , на траєкторію руху її матеріальної точки (рис. 5).

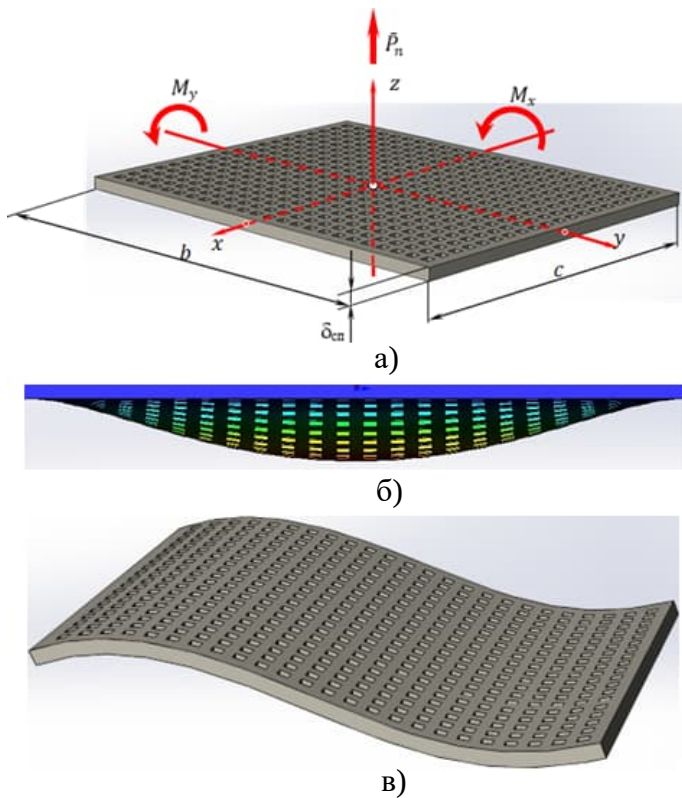
На п'ятому кроці проводилось вивчення впливу маси сіячої поверхні на траєкторію руху її матеріальної точки. При дослідженнях була прийнята умова постійності амплітуди коливань корпусу грохоту. Результати досліджень приведені на рис. 6.

Опрацювання отриманих результатів дало змогу встановити, що кут нахилу сіячої поверхні до горизонту в діапазоні від 10° до 20° не впливає на динаміку її переміщення, а при збільшенні маси поверхні амплітуда коливань її матеріальної точки підвищується за умови постійності амплітуди коливань корпусу.

Проведені дослідження руху сіячої поверхні в просторі, утвореним підситником, показали, що при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях корпусу на сіячу поверхню, вільно укладену в просторі, утвореним швелероподібним підситником, може бути наведено дві форми руху: зворотно-поступальний (рис. 7, а) та поворотне-обертальний (рис. 7, б).

Таке різноманіття видів рухів сіячої поверхні, передусім пояснюється її вільним укладенням та наявністю проміжку між верхньою опорною поверхнею підситника та тілом сіячої поверхні, що збільшує кількість її ступенів свободи.

Крім того, енергетично процес руху підтримується різноманітністю та величиною



а - силові чинники; б - перша форма деформації; в - друга форма деформації
Рис. 8. Силові чинники, які можуть бути прикладені до сіячої поверхні в процесі роботи вібраційної машини

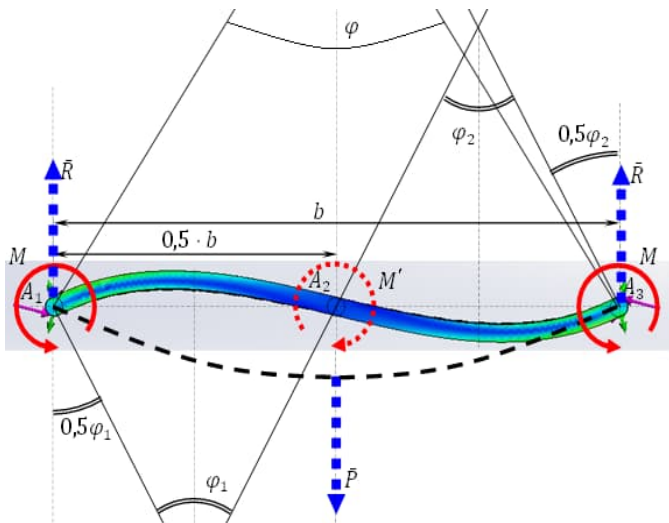


Рис. 9. Розрахункова схема до визначення енергії для першої та другої форми деформацій

зовнішніх силових чинників, прикладених до тіла сіячої поверхні при різних її конфігураціях в просторі, утвореним швелероподібним підситником.

Різноманіття рухів, які наводяться на сіячу поверхню, призводить до порушення сталого процесу переміщення та просіювання технологічного матеріалу, що посилюється виникненням складних форм деформації тіла сіячої поверхні. Таким чином, визначення умов наведення на сіячу поверхню режимів руху, має важливе значення.

Оскільки, енергія зовнішніх силових чинників не може перевищувати енергію того деформованого стану, який вони викликають, то існують певні форми деформованого стану, які можуть розвиватися в системі діючих зовнішніх силових чинників, прикладених до тіла сіячої поверхні з боку опорних поверхонь підситника в процесі функціонування вібраційної машини (рис. 8, а). Нормальна сила інерції сприяє утворенню першої форми деформації сіячої поверхні як в подовжньому, так і в поперечному напрямі (рис. 8, б), а моменти M_x і M_y від сил інерції, формують її другу форму (рис. 8, в).

Для визначення енергії для першої та другої форми деформацій була прийнята розрахункова схема наведена на рис. 9.

Енергія пружної деформації при згині за першою формою деформованого стану з урахуванням деформації одночасно в двох площинах визначалась співвідношенням

$$U^{(1)} = \frac{3 \cdot K_{ж.п}^2 \cdot \rho^2 \cdot a_e^2}{2 \cdot \delta_{сп} \cdot E} \times (b^5 \cdot c + c^5 \cdot b) \text{ Дж}, \quad (1)$$

де $K_{ж.п}$ – коефіцієнт, що враховує живий перетин сіячої поверхні; ρ – густина матеріалу сіячої поверхні, кг/м^3 ; a_e – прискорення, м/с^2 ; $\delta_{сп}$ – товщина тіла сіячої поверхні.

ні, м; E – модуль Юнга матеріалу сіячої поверхні, Па; b , c – відповідно довжина та ширина тіла сіячої поверхні, що піддається згину першого роду, м.

При другій формі деформації дві зв'язані між собою напівхвилі представлялись як суперпозиція двох протилежних перших форм деформації тіла сіячої поверхні, таким чином, енергія деформації складала

$$U^{(2)} = \frac{3 \cdot K_{ж.п}^2 \cdot b^5 \cdot \rho^2 \cdot a_e^2 \cdot c}{2 \cdot E \cdot \delta_{сп}} \text{ Дж.} \quad (2)$$

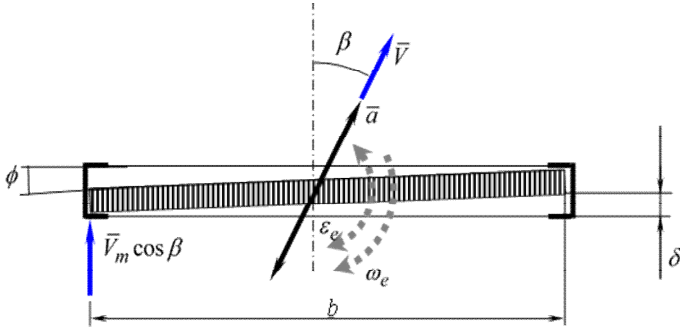


Рис. 10. Кінематична схема обертання сіячої поверхні при її галопуванні в однорідному вібраційному полі

Підчас перекосу сіячої поверхні під дією реакції зв'язку з опорною поверхнею підситника виникає її плоскопаралельний рух. Реакція зв'язку при цьому утворює головний вектор і момент сил інерції щодо ребра сіячої поверхні, відносно котрого починається її обертання (рис. 10). Такий підхід обумовлений тим, що до початку руху сіяча поверхня є нерухомою та вільно укладеною на опорну поверхню підситника.

При поступальному русі сіячої поверхні її максимальна кінетична енергія складе

$$K_{mp} = [K_{ж.п} \cdot \rho \cdot b \cdot c \cdot \delta_{сп} \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2 \beta] / 2 \text{ Дж.} \quad (3)$$

Максимальна кінетична енергія обертального руху сіячої поверхні за половину періоду коливань коробу в процесі її галопування, враховуючи теорему Штейнера, визначалась як

$$K_{m\omega} = [K_{ж.п} \cdot \rho \cdot b \cdot c \cdot \delta_{сп} \cdot (4 \cdot b^2 + \delta_{сп}^2) \cdot A^2 \cdot \omega^2 \times \cos^2 \beta] / [24 \cdot b^2] \text{ Дж.} \quad (4)$$

Аналіз відношень потенційної енергії (5) для обох форм деформації, враховуючи, що довжина сіячої поверхні для поширених конструкцій вібраційних машин більша за її ширину $b > c$, та максимальної кінетичної енергії (6) для поступального та обертального рухів дозволив вперше встановити, що геометричні розміри сіячої поверхні є незалежним фактором, який впливає на потенційну та кінетичну енергії для обох форм деформації поступального і обертального рухів, а поворотне-обертальний є переважальним режимом її роботи при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях коробу.

$$\frac{U^{(2)}}{U^{(1)}} = \frac{1}{1 + c^4/b^4} < 1 \Rightarrow U^{(1)} > U^{(2)}; \quad (5)$$

$$\frac{K_{mp}}{K_{m\omega}} = \frac{12 \cdot b^2}{4 \cdot b^2 + \delta_{сп}^2} > 1 \Rightarrow K_{mp} > K_{m\omega}, \quad (6)$$

В третьому розділі наведені теоретичні дослідження процесів самоочищення вільно укладеної сіячої поверхні та стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти, що на ній розсипається.

При вивченні самоочищення сіячої поверхні, для спеченого матеріалу була запропонована розрахункова схема, яка наведена на рис. 11, та прийняті такі допущення: форма частинки — рівнобічна трапеція, сума основ якої дорівнює подвоєній до-

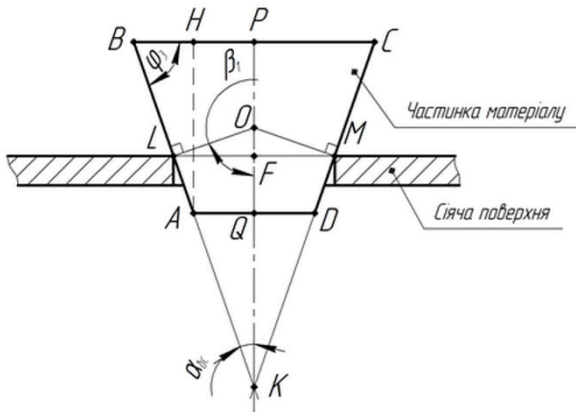


Рис. 11. Розрахункова схема до визначення розміру частинки, що заклинила у отворі сіячої поверхні

важині її бічної сторони; якщо $\alpha_{\text{бс}}$ — кут нахилу бічної сторони трапеції до вертикальної площини, а $\alpha_{\text{тер}}$ — кут тертя частинки о сіячу поверхню, то у випадку $\alpha_{\text{тер}} > \alpha_{\text{бс}}$ відбувається заклинювання частинки у отворі сіячої поверхні, але при русі сіячої поверхні вгору вона може бути викинута з отвору під дією прикладеної до неї сили інерції, якщо її складова (яка перпендикулярна сіячій поверхні) буде перевищувати силу тертя, що утворилась при взаємодії поверхні частки з окрайком отворів сіячої поверхні; $\alpha_{\text{тер}} < \alpha_{\text{бс}}$ заклинювання не відбувається, а при $\alpha_{\text{тер}} = \alpha_{\text{бс}}$ реалізується граничний стан заклинювання.

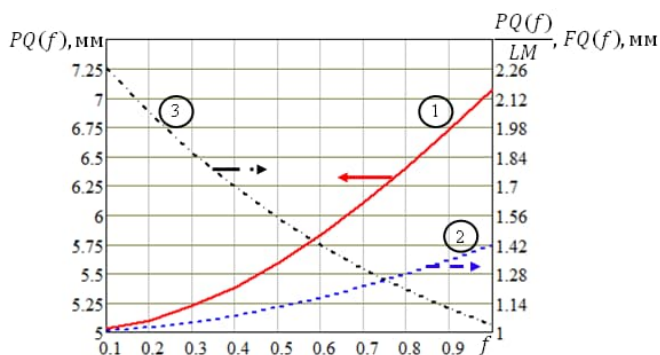
З урахуванням прийнятих допущень і побудованої розрахункової схеми (рис. 11) отримано умову заклинювання частинки

$$LM \lesssim PQ \leq \frac{LM}{\cos(\arctg f)}, \quad (7)$$

де f — коефіцієнт тертя матеріалу, що розсипається, о сіячу поверхню;

та граничне значення висоти частки, що відсікається площиною сіячої поверхні

$$FQ = \frac{LM \cdot (1 - \sin(\arctg f))}{2 \cdot \cos(\arctg f)} < h_{\text{п}}. \quad (8)$$



1 — $PQ(f)$; 2 — $PQ(f)/LM$; 3 — $FQ(f)$

Рис. 12. Граничний розмір частинки матеріалу, що розсипається, та висоти частки, що відсікається площиною сіячої поверхні, в залежності від її коефіцієнта тертя по сіячій поверхні

Крім того, проведено аналіз зміни граничного розміру частинки PQ та значення висоти частки FQ , що відсікається площиною сіячої поверхні з отвором, який дорівнює $LM = 5$ мм, на всьому діапазоні зміни значення коефіцієнта тертя f (рис. 12).

У результаті вперше отримано практично підтверджені аналітичні залежності, які визначають розмір частинки матеріалу та висоту її підкидання, більше якої заклинювання не відбувається, в залежності від апертури сіячої поверхні, її фізичних властивостей та виду матеріалу, що розсипається.

ся, на основі яких встановлено, що в отворі сита здатні заклинюватись частинки, розмір яких в 1...1,4 рази більше розміру отвору, причому більше значення відповідає максимальному значенню коефіцієнта тертя, мінімально необхідна висота підкидання частинки зі збільшенням коефіцієнту тертя зменшується, а сама залежність описується степеневою функцією.

При визначенні зусилля заклинювання частинки матеріалу, що просівається, в отворах сіячої поверхні виходили з наступних припущень: кінетична енергія шару матеріалу, що падає, повністю переходить в потенціальну енергію деформації частинки; закон розподілення напружень та деформацій за об'ємом частинки залишається таким же, як при статичній дії сили; деформація виникає миттєво у всіх перетинах

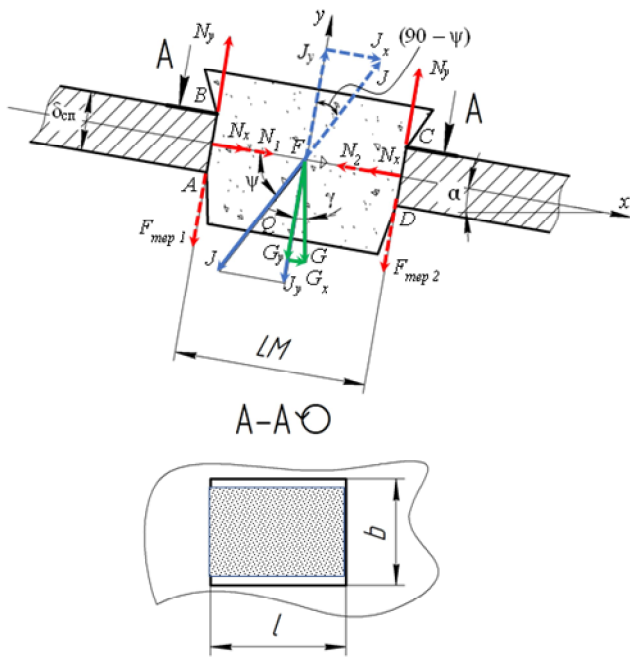


Рис. 13. Схема сил, що діють на частинку підчас заклинення (—) та вивільнення (-----)

частинки; у момент зіткнення шару матеріалу з сіячою поверхнею шар взаємодіє з нею як непружне тверде тіло; матеріал частинки та сіячої поверхні підкоряється закону Гука, а деформації малі; процес заклинювання приймався адитивним, а дію від сил інерції та удару матеріалу визначали використовуючи метод суперпозиції.

На підставі прийнятих допущень та розрахункової схеми (рис. 13) була вперше отримана аналітична залежність (9), яка дозволяє визначити силу заклинювання частинки матеріалу, що розсівається, розміром менше граничного, в отворі сіячої поверхні, враховуючи фізичні властивості матеріалу та сіячої поверхні, її геометричні розміри, кінематичні та динамічні параметри

$$F_{\text{тер}} = \mu_{\text{п}} \cdot \delta_{\text{сп}} \cdot f \cdot \left(\frac{LM \cdot b \cdot \rho \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{\cos^3(\arctg f)} + \frac{1}{LM} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot \Delta E_{\text{к}} \cdot E}{\text{ctg}(\arctg f) \cdot \left(\ln \left| \frac{LM}{1 - \sin(\arctg f)} \right| - \ln |LM| \right)}} \right) \text{ Н}, \quad (9)$$

де $\mu_{\text{п}}$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу частинки; a – прискорення пересування частинки разом з сіячою поверхнею, м/с^2 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; ψ – кут вібрації, град; $\Delta E_{\text{к}}$ – втрата кінетичної енергії підчас центрального абсолютно непружного удару виділеного об'єму шару матеріалу, що транспортується, по частинці, що заклинилась, Дж.

Для побудови математичної моделі процесу самоочищення сіячої поверхні розглядались два етапи, які протікають сумісно в часі. На першому етапі відбувається

подолання сили тертя, що утримує частинку в отворі, величина якої визначається за (9). Другий етап полягає в евакуації частинки з отвору сіячої поверхні внаслідок її підкидання на висоту, яка перевищує відсічену площиною поверхні сита висоту частинки FQ , що визначається за формулою (8). Обидва етапи реалізуються під дією складової сили інерції, перпендикулярної до площини сіячої поверхні, залежно від її напрямку ця сила може спричиняти як заклинювання частинки в отворі, так і її видалення, забезпечуючи очищення поверхні.

Спираючись на сформульовані допущення та використану розрахункову схему (рис. 13), були отримані умови: розклинювання частинки матеріалу, що заклинилась у отворі сіячої поверхні

$$\frac{LM^2}{\cos^3(\arctg f)} \cdot b \cdot \rho \cdot a > \left[\mu_{\pi} \cdot \delta_{\text{сп}} \cdot f \cdot \left(\frac{LM \cdot b \cdot \rho \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{\cos^3(\arctg f)} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{LM} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot \Delta E_{\kappa} \cdot E}{\text{ctg}(\arctg f) \cdot \left(\ln \left| \frac{LM}{1 - \sin(\arctg f)} \right| - \ln |LM| \right)}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{LM^2}{\cos^3(\arctg f)} \cdot b \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha \right] / \sin \psi; \quad (10)$$

та евакуації частинки з отвору сіячої поверхні

$$\frac{LM \cdot (1 - \sin(\arctg f))}{2 \cdot \cos(\arctg f)} < \frac{V_{\text{ч}}^2 \cdot \sin^2 \psi}{2 \cdot g \cdot \cos \alpha}, \quad (11)$$

де $V_{\text{ч}}$ – швидкість частинки в момент відриву від сіячої поверхні, яка визначається за кінематичною діаграмою руху системи «частинка-сито», м/с.

Нерівності (10), (11) є вперше отриманою теоретично обґрунтованою умовою евакуації частинки матеріалу, що заклинилась, з отворів сіячої поверхні вільно укладених в просторі підситника вібруючого коробу з урахуванням фізичних властивостей матеріалу, що розсівається, апертури сита, його конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів, на підставі практично підтвердженої математичної моделі процесу очищення сіячої поверхні.

Для аналітичного опису руху частинки матеріалу на вільно укладеній сіячій поверхні процес розглядався як такий, що складається з двох послідовних етапів, перший етап — спільний рух частинки з сіячою поверхнею; другий етап — звільнення частинки від одностороннього зв'язку з сіячою поверхнею та вільний рух під дією сили гравітації до зіткнення з нею.

Закон переміщення частинки матеріалу на першому етапі визначається як

$$\begin{cases} x_{1\text{ч}}(t) = 0 \\ y_{1\text{ч}}(t) = y(t) \end{cases} \quad (12)$$

де $y(t)$ – закон коливального руху сіячої поверхні у нормальному до неї напрямку.

Кінець першого етапу відбувається коли нормальна реактивна сила, прикладена до частинки матеріалу зі сторони прискореної сіячої поверхні, досягає нульового значення.

За цих умов розрив одностороннього зв'язку описується такою залежністю

$$-J_y - G \cdot \cos \alpha = 0, \quad (13)$$

де J_y – сила інерції, прикладена зі сторони частинки матеріалу на прискорену сіячу поверхню, Н; α – кут нахилу сіячої поверхні до горизонту, град.

У відповідності до основного закону механіки точки, закон переміщення частинки матеріалу на другому етапі, з урахуванням початкових умов, має вигляд

$$\begin{cases} x_{2ч}(t) = 0,5 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot t^2 + V_{1чx}(t_B) \cdot t + x_{1ч}(t_B) \\ y_{2ч}(t) = -0,5 \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot t^2 + V_{1чy}(t_B) \cdot t + y_{1ч}(t_B), \end{cases} \quad (14)$$

де $V_{1чx}(t_B)$, $V_{1чy}(t_B)$ – проекції початкової швидкості частинки матеріалу в момент відповідного відриву м/с; $x_{1ч}(t_B)$, $y_{1ч}(t_B)$ – дотична та нормальна координата положення частинки матеріалу відповідно, м.

Час закінчення другого етапу $t_{з\text{іт}}$ визначається з системи рівнянь, які відображають рух сіячої поверхні $y(t)$ та частинки матеріалу (14) при умові, що відповідні координати місця зустрічі збігаються за своїм значенням.

Отримані системи рівнянь (12), (14) та гранична умова (13) є вперше розробленою математичною моделлю, яка описує процес руху частинки матеріалу, що розсівається, по сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу.

Для дослідження процесу переміщення частинки, використовуючи чисельні методи, був створений програмний продукт, який реалізовував алгоритм розрахунку, що базувався на математичній моделі руху сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, та руху частинки матеріалу, що розсівається, по ній. Дослідження проводились для чотирьох варіантів початкових даних, які відрізнялись кінематичними параметрами коробу, а саме, прискореннями коливань в діапазоні від 18 до 47 м/с² при постійній амплітуді $A = 0,003$ м та змінних кругових частотах $\omega = 79; 94; 105; 126$ с⁻¹. За результатами були отримані кінематичні характеристики першого етапу руху частинки матеріалу, що розсівається, та її траєкторію руху на другому етапі.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що зі збільшенням прискорення коливань коробу грохоту середня швидкість руху та її прискорення на початковому етапі, як і середня висота підкидання та період її вільного руху на другому етапі, збільшуються.

Дослідження ударної взаємодії матеріалу та сіячої поверхні з умови стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти виконувалось виходячи з наступних уявлень про процес.

При вібраційному діянні на шар шихти, що розсівається на сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, спостерігається ударна взаємодія шматків матеріалу з нею, це може розглядатись як елемент стабілізації гранулометричного складу та механічної міцності частинок, з яких складається шар, за рахунок часткового руйнування по чисельних тріщинках, утворених в шлакових зв'язках або зонах застосування, які є наслідком порушення режиму охолодження, під впливом динамічних навантажень.

Підчас аналізу цього процесу були прийняті наступні припущення: дроблення шматків матеріалу відбувається в момент їх зіткнення з сіячою поверхнею за умови досягнення значення критичної енергії удару на матеріал, що розсівається; підчас зіткнення шматка матеріалу з сіячою поверхнею він взаємодіє з нею як непружне тверде тіло; в проміжках між зіткненнями частинка рухається відповідно до закону (12) та (14), а сіяча поверхня за законом поступального руху; у процесі розрахунку враховувалась лише нормальна складова швидкості, оскільки ударні взаємодії пов'язані лише з вертикальними коливаннями.

Відповідно до прийнятих допущень, енергія, яка спрямовується на руйнацію частинки, визначається за формулою

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot V^2 \text{ Дж}, \quad (15)$$

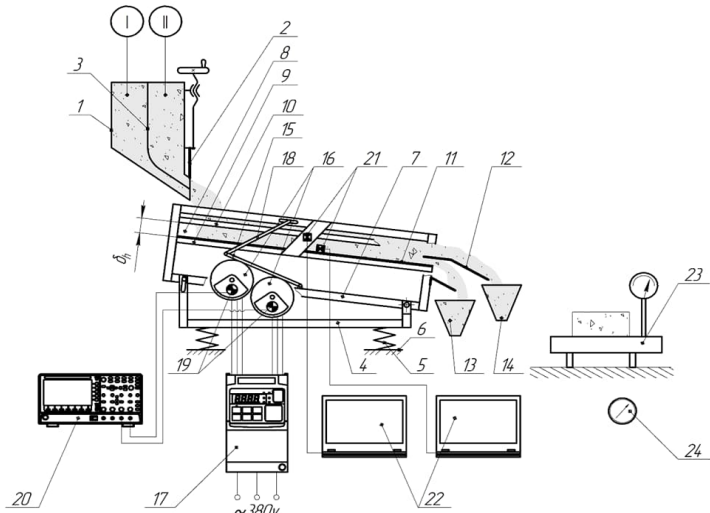
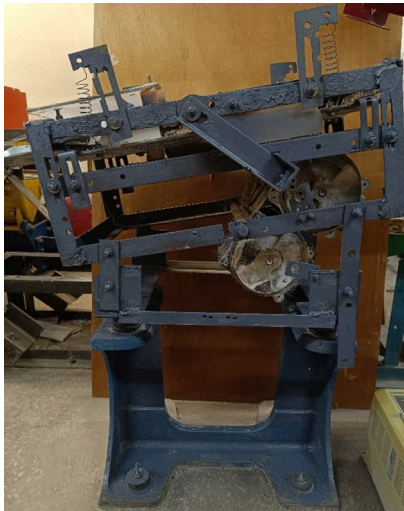
де μ_p – приведена маса частинки матеріалу та сіячої поверхні, кг; V – відносна швидкість руху частинки матеріалу та сіячої поверхні м/с.

Використовуючи чисельні методи були проведені дослідження впливу на енергію, яка утворюється підчас зіткнення частинки матеріалу з сіячою поверхнею та спрямовується на її руйнацію E_p , кінематичних параметрів вібруючого коробу з вільно укладеною в просторі підситника сіячою поверхнею, прискорення коливань якого змінювались в діапазоні від 18 до 47 м/с² при постійній амплітуді $A = 0,003$ м та змінних кругових частотах $\omega = 79; 94; 105; 126$ с⁻¹. Дослідження проводились для граничних розмірів частинок надрешітного матеріалу (агломерату), що розсівається, — 5 та 40 мм. Енергія навантаження, необхідна для стабілізації надрешітного матеріалу, відповідно до проведеного огляду, була прийнята 50 Дж/кг, що для вищезазначеного розміру частинок становить 0,111 та 5,55 Дж відповідно.

На підставі отриманих результатів теоретичне обґрунтовано, що необхідна ефективність процесу стабілізації гранулометричного складу агломерату та механічної міцності частинок надрешітного продукту фракцією 5...40 мм шляхом їх руйнування по концентраторах напруження на сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, досягається за умови прискорення його коливань в межах від 32,9 до 47,3 м/с² при сталій амплітуді $A = 0,003$ м.

В **четвертому розділі** наведено результати лабораторних досліджень роботи вібраційно-ударних машин, спрямованих на вивчення динамічного стану системи, внутрішньошарових процесів в шихтових матеріалах під дією вібраційно-ударного впливу, процесу очищення сіячої поверхні під час грохочення, визначення раціональних кінематичних і динамічних параметрів, які відповідають необхідним технологічним вимогам ділянок підготовки шихти перед коксуванням і плавкою, перевірку адекватності запропонованої математичної моделі руху сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником.

Лабораторна модель машини вібраційно-ударної дії з вільно укладеною сіячою поверхнею (рис. 14) проектувалась на основі фізичної подібності моделі натурі — найбільш поширений типорозмір грохотів для розсіву агломерату.



- 1 - бункер; 2 - шиберний затвор; 3 - перегородка; 4 - лафет; 5 - пружинні опори; 6 - фундамент;
7 - рама; 8 - короб; 9 - нерухомий опорний кутник; 10 - рухомий опорний кутник; 11 - сіяча по-
верхня; 12 - дільний ніж; 13, 14 - приймальний бункер; 15 - підвібраторна плита;
16 - мотор-вібратор; 17 - частотний перетворювач; 18 - тяга; 19 - фазовий датчик;
20 - осцилограф; 21 - датчик прискорення; 22 - лептоп; 23 - електронні ваги; 24 - секундомір

Рис. 14 Лабораторна модель машини вібраційно-ударної дії з вільно укладеною сіячою поверхнею

Дослідження динамічного стану системи вібраційно-ударної дії проводились при прискореннях коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 18 \dots 47 \text{ м/с}^2$, причому, кожне значення прискорення отримували при постійній амплітуді ($A = 0,003 \text{ м}$) підбором відповідної величини частоти коливань ω . Для кожного значення динамічних параметрів коробу вимірювалось прискорення сіячої поверхні в одиницю часу при направлених коливаннях робочого органу з кутом вібрації $\beta = 40^\circ$ до нормалі, проведеної до опірної поверхні підситника в подовжній площині.

За результатами обробки масиву даних були отримані осцилограми виміру прискорення сіячої поверхні для кожного вищезазначеного динамічного параметру коробу, одна з характерних осцилограм наведена на рис. 15. На отриманих осцилограмах було виділено дві характерні зони, які відповідають етапам несталого ($t_{н.р}$) та усталеного руху сіячої поверхні.

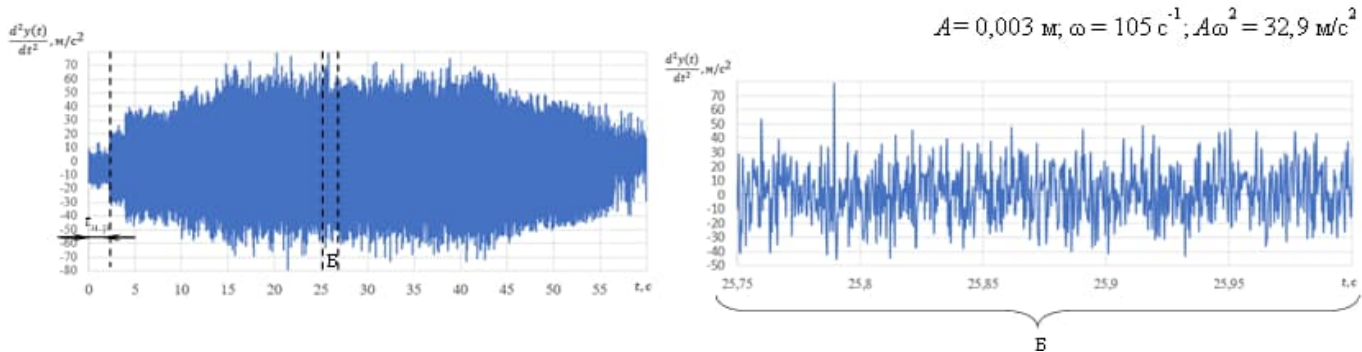


Рис. 15. Характерна осцилограма виміру прискорення сіячої поверхні

Порівняльний аналіз часу несталого руху сіячої поверхні в просторі, утвореним швелероподібним підситником (див. рис. 16), отриманого розрахунковим методом ($\widehat{t_{н.р}}$), використовуючи емпіричну залежність, та підчас натурних випробувань

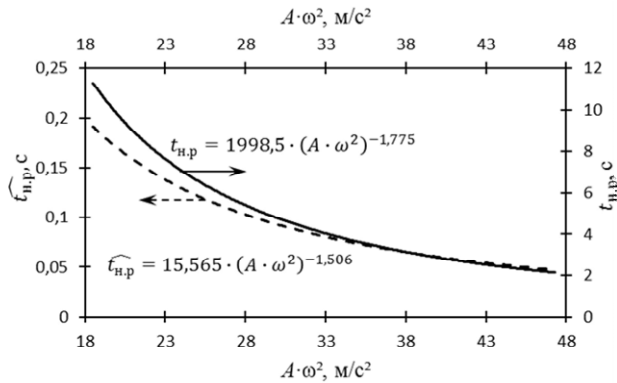


Рис. 16. Залежність часу несталого руху сіячої поверхні від прискорення коливань коробу

($t_{н.р}$) показав, що зі збільшенням частоти коливань коробу він зменшується за степеневим законом в межах дослідженої області прискорень від 18 до 47 м/с², та може бути визначений з достатнім ступенем точності для інженерних розрахунків за емпіричною залежністю

$$t_{н.р} = 1998,5 \cdot (A \cdot \omega^2)^{-1,775} \text{ с.} \quad (16)$$

Оцінка впливу режиму роботи грохоту з вільно укладеною сіячою поверхнею на інтенсивність внутрішньосферних процесів в шихтових матеріалах виконувалась двома серіями експериментів, досліди проводились в діапазоні прискорень коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 9 \dots 74$ м/с², кожне значення прискорень отримували при трьох значеннях амплітуди його коливань ($A = 0,001$ м; $A = 0,002$ м; $A = 0,003$ м) та кутової частоти вимушених коливань коробу ($\omega = 94,2$ с⁻¹; $\omega = 125,6$ с⁻¹; $\omega = 157$ с⁻¹), при куті нахилу сіячої поверхні до горизонту $\alpha = 10^\circ$.

Оскільки, інтенсивність процесу дифузії більшою мірою залежить від вертикальної складової прискорень коливань коробу, а інтенсивність сегрегації вища при дотичних до сіячої поверхні, для унеможливлення опосередкованого впливу вищезазначеного параметру кут вібрації до нормалі, проведеної до опорної поверхні підситника в подовжній площині, приймався $\beta = 45^\circ$.

Перша серія досліджень була спрямована на визначення інтенсивності сегрегації, яка характеризує ступінь направленої, зобов'язаної сегрегації, руху «дрібної» фракції, що знаходиться в шарі матеріалу, перебуваючого під впливом вібраційно-ударної дії, на контакт з вільно укладеною сіячою поверхнею

$$I_s = \frac{d_{2\text{сеп}} - d_{\text{сеп}}^H}{t} + \frac{d_{\text{сеп}}^B - d_{1\text{сеп}}}{t} \text{ мм/с,} \quad (17)$$

де $d_{1\text{сеп}}$, $d_{2\text{сеп}}$ – середній діаметр «дрібної» та «крупної» фракції відповідно; $d_{\text{сеп}}^B$, $d_{\text{сеп}}^H$ – середній діаметр частинок у верхній та нижній пробах відповідно.

Друга серія досліджень була спрямована на визначення інтенсивності дифузії, яка характеризує ступінь процесу випадкового, стохастичного перемішування, зобов'язаного дифузії руху частинок «дрібної» та «крупної» фракцій в шарі матеріалу, що перебуває на сіячій поверхні під впливом вібраційно-ударної дії

$$I_d = \frac{d_{\text{сеп}}^H - d_{1\text{сеп}}}{t} + \frac{d_{2\text{сеп}} - d_{\text{сеп}}^B}{t} \text{ мм/с.} \quad (18)$$

На підставі проведених досліджень і отриманих залежностей (рис. 17) встановлено, що ефект розділення сипкого матеріалу за крупністю та перемішування в шарі матеріалу є результатом одночасного протікання процесів сегрегації та дифузії, причому доставка дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею відбувається переважно за рахунок сегрегації на всьому діапазоні амплітуд та кутової частоти вимушених коливань коробу.

Для вивчення взаємовпливу динамічних параметрів коробу на інтенсивність протікання внутрішньосферних процесів при вібраційно-ударній дії був проведений повний факторний експеримент, в якому реалізовано ортогональну план-матрицю другого порядку, математичний опис залежності інтенсивності сегрегації та дифузії від обраних факторів здійснювався за допомогою квадратичного рівняння регресії

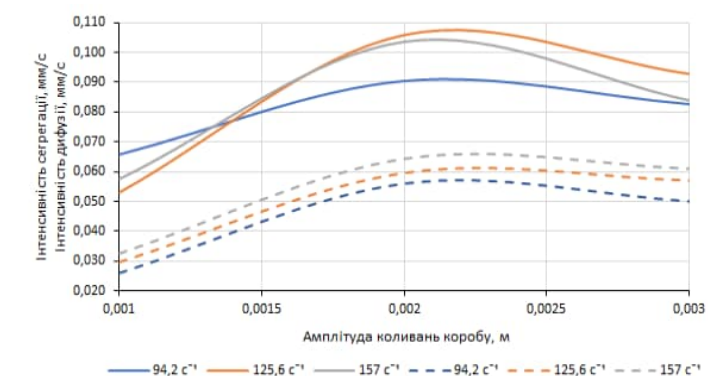
$$I_s = -0,0713 + 113 \cdot A + 7 \cdot 10^{-4} \cdot \omega + 0,072 \cdot A \cdot \omega - 27000 \cdot A^2 - 3,212 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \text{ мм/с}; \quad (19)$$

$$I_d = 0,053 + 77 \cdot A + 2,44 \cdot 10^{-4} \cdot \omega + 0,032 \cdot A \cdot \omega - 17000 \cdot A^2 - 6,76 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2 \text{ мм/с}, \quad (20)$$

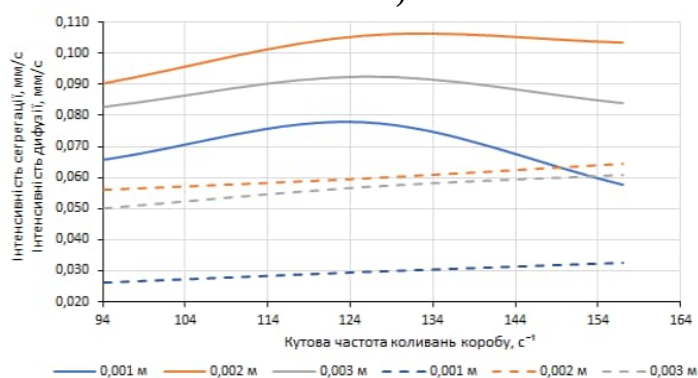
які відображають вплив амплітуди та кутової частоти вимушених коливань коробу,

на інтенсивність сегрегації та дифузії в шарі сипкого матеріалу під впливом вібраційно-ударної дії, при 20 % рівні значності, які дозволили встановити що найбільший вплив на внутрішньосферні процеси має амплітуда коливань коробу, а для інтенсивної доставки дрібних фракцій на контакт з вільно укладеною сіячою поверхнею слід забезпечити режим коливань з прискоренням 32 м/с^2 при амплітуді $0,002 \text{ м}$.

Для дослідження впливу вібраційно-ударної дії на технологічні показники грохоту, в якості параметрів оптимізації, які найбільш повно відображають його технологічну ефективність, були прийняті: транспортна продуктивність, забиваність, ефективність грохочення та поглинальна здатність. В ролі факторів були визначені параметри, що повною мірою характеризують стан динамічної системи — кутова частота вимушених коливань коробу ($\omega = 94,2 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 125,6 \text{ с}^{-1}$;



а)



б)

— Інтенсивність сегрегації I_s
 - - - - - Інтенсивність дифузії I_d

Рис. 17. Залежність інтенсивності внутрішньосферних процесів від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

$\omega = 157 \text{ с}^{-1}$) та їх амплітуда ($A = 0,001 \text{ м}$; $A = 0,002 \text{ м}$; $A = 0,003 \text{ м}$). Кут нахилу сіячої поверхні до горизонту та кут вібрації до нормалі, на всьому діапазоні значень факторів були сталими і дорівнювали відповідно $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 45^\circ$. Дослідження проводились при направлених коливаннях коробу з закріпленою та вільно укладеною сіячою поверхнею.

Транспортна продуктивність визначалась при постійній висоті шару матеріалу $H_{\text{ш}} = 60$ мм, що транспортувався, отримані результати наведені на рис. 18.

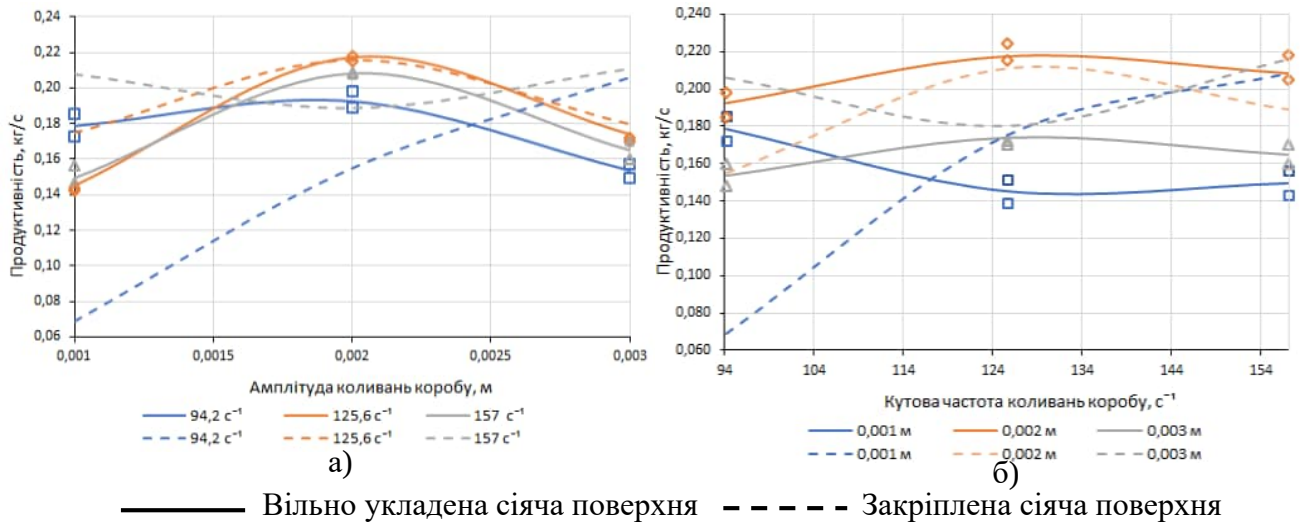


Рис. 18. Залежність транспортної продуктивності від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

Отримані функціональні залежності дозволили встановити, що в досліджуваній області визначення функції транспортна продуктивність має стійку залежність від амплітуди коливань коробу та кутової частоти, а функціональна залежність має екстремальний характер, причому, необхідну швидкість транспортування матеріалу, котрий розсівається, слід забезпечувати шляхом більшого кута нахилу сіячої поверхні в зв'язку з особливостями режиму її галопування.

Математичний опис залежності транспортної продуктивності від обраних факторів здійснювався за допомогою квадратичного рівняння регресії

$$Q_{\text{тр}} = 0,0154 + 78 \cdot A + 0,0015 \cdot \omega + 0,5732 \cdot A \cdot \omega - 34000 \cdot A^2 - 9,94 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \text{ кг/с.} \quad (21)$$

Одержана математична модель при 20 % рівні значності дозволила визначити, що максимальна транспортна продуктивність забезпечується за режиму коливань з прискоренням 28...32 м/с² при амплітуді 0,002 м.

Визначення ступеня забиваності сіячої поверхні виконувалось за допомогою коефіцієнта забиваності.

Встановлення картини забиваності сіячої поверхні виконувалось шляхом її фотографування після проведення дослідів для кожної пари значень динамічних параметрів коробу. В якості матеріалу використовувався відсів агломерату, гранулометричний склад якого підбирався з умови максимальної забиваності апертури сіячої поверхні, використовуючи залежності (7) та (8). Для сіячої поверхні з апертурою круглої форми діаметром 5 мм застосовувалась фракція 5...6 мм. Досліди проводились при постійному питомому навантаженні по вихідному живленню, підтримуючи постійність висоти шару шихти у 60 мм.

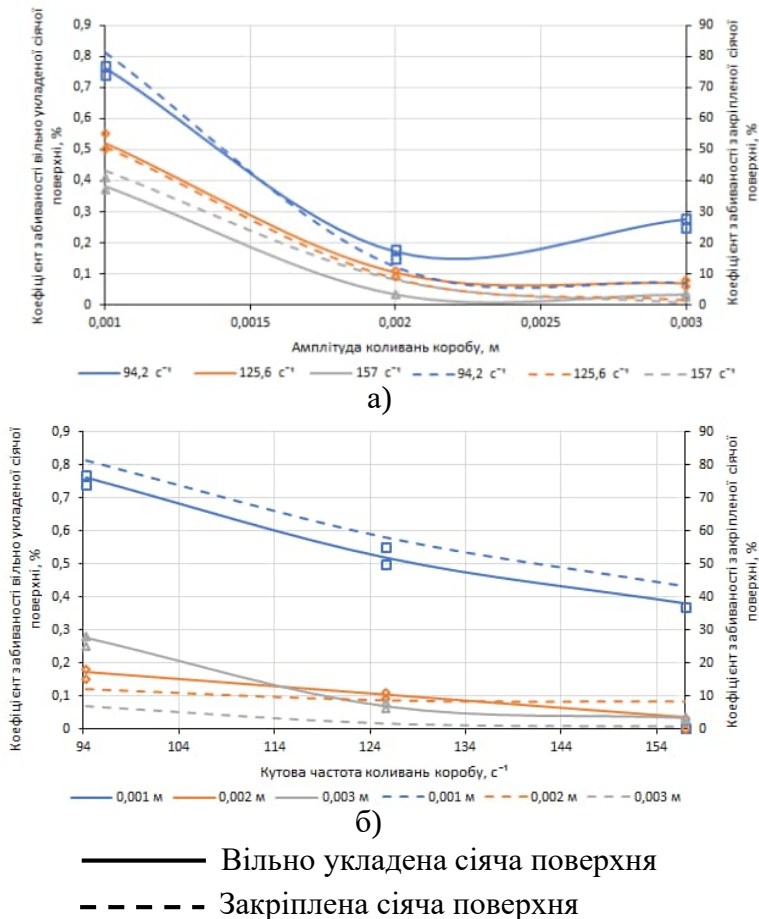


Рис. 19. Залежність коефіцієнта забиваності від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

фіцієнт забиваності сіячої поверхні вібраційно-ударних машини з невтримним зв'язком між ситом і коробом з амплітудою та кутовою частотою його вимушених коливань при 20 % рівні значності

$$K_{\text{заб}} = 0,003 - 1610 \cdot A + 0,035 \cdot \omega + 1,115 \cdot A \cdot \omega + 340000 \cdot A^2 - 0,0002 \cdot \omega^2 \% \quad (22)$$

яка дозволила встановити, що інтенсифікація процесу очищення відбувається за умови збільшення як амплітуди коливань коробу, так і її частоти, причому, враховуючи енергоефективність та результативність процесу очищення, найбільш прийнятним значенням коефіцієнта забиваності є 0,2 %, який забезпечується амплітудою коливань 0,0018...0,0022 м при частоті 94,2...102 с⁻¹, що відповідає прискоренням від 16 до 23 м/с² та амплітуді 0,0022 м при частоті 125,6 с⁻¹, що еквівалентне прискоренню 35 м/с².

Досліди по визначенню ефективності грохочення проводились на вільно укладеній та закріпленій сіячих поверхнях з круглими отворами діаметром 5 мм і коефіцієнтом живого перетину 0,53. Для унеможливлення впливу на ефективність грохочення інших факторів, окрім дифузії та сегрегації, гранулометричний склад початкової шихти, на основі відсіву агломерату, підбирався виходячи з вимог забезпечення високої поглинальної здатності закріпленої сіячої поверхні, це здійснювалось за рахунок використання легкогрозотних частинок, розміри котрих обирались з умови,

Результати досліджень наведені на рис. 19, з яких видно, що при вібраційно-ударній дії з невтримним зв'язком між ситом і коробом за його однакових динамічних параметрах коефіцієнт забиваності в середньому в 7...10 разів менше, це свідчить про більш ефективне протікання процесу смоочищення апертури сіячої поверхні. Встановлено, що при використанні фракції менше граничного значення, заклинювання частинками матеріалу отворів сіячої поверхні досягає 43...81 %, а значення прискорення, яке забезпечує максимальне самоочищення, менше за розрахункове на 8 %, що вказує на достовірність методики розрахунку граничного розміру частинки матеріалу та адекватність математичної моделі процесу самоочищення сіячої поверхні.

Також було одержано математичну модель, що пов'язує кое-

що відношення розміру частинки до розміру отвору сита не повинно перевищувати 0,75 та її незабиваності, цим критерієм відповідала двохфракційна суміш відсіву агломерату у пропорції 50/50: $d_1 = 1,6 \dots 3$ мм та $d_2 = 8 \dots 10$ мм.

Це дало змогу встановити функціональні залежності ефективності грохочення від амплітуди та кутової частоти коливань коробу з вільно укладеною та закріпленою сіячою поверхнею (рис. 20), які показують, що при однакових динамічних параметрах коробу ефективність грохочення вібраційно-ударної машини з невтримним зв'язком між коробом і ситом перевищує ефективність грохочення грохоту з закріпленою сіячою поверхнею в середньому на 29 %, що підтверджує факт інтенсифікації внутрішньосієвих процесів, такі як сегрегація та дифузія, причому першу в більшій ступені, призводячи до прискорення доставки дрібних фракції на контакт з сіячою поверхнею та їх подальшим відсівом при вібраційно-ударній дії на шар сипкого матеріалу, який транспортується по вільно укладеній сіячій поверхні.

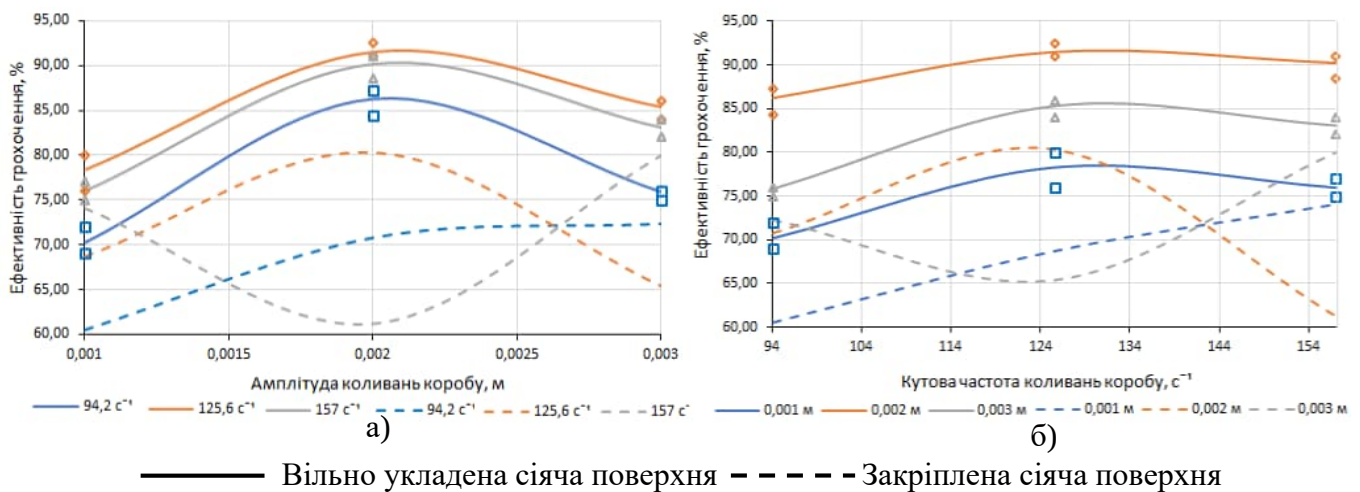


Рис. 20. Залежність ефективності грохочення від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

Математичний опис залежності ефективності грохочення від обраних факторів здійснювався за допомогою квадратичного рівняння регресії

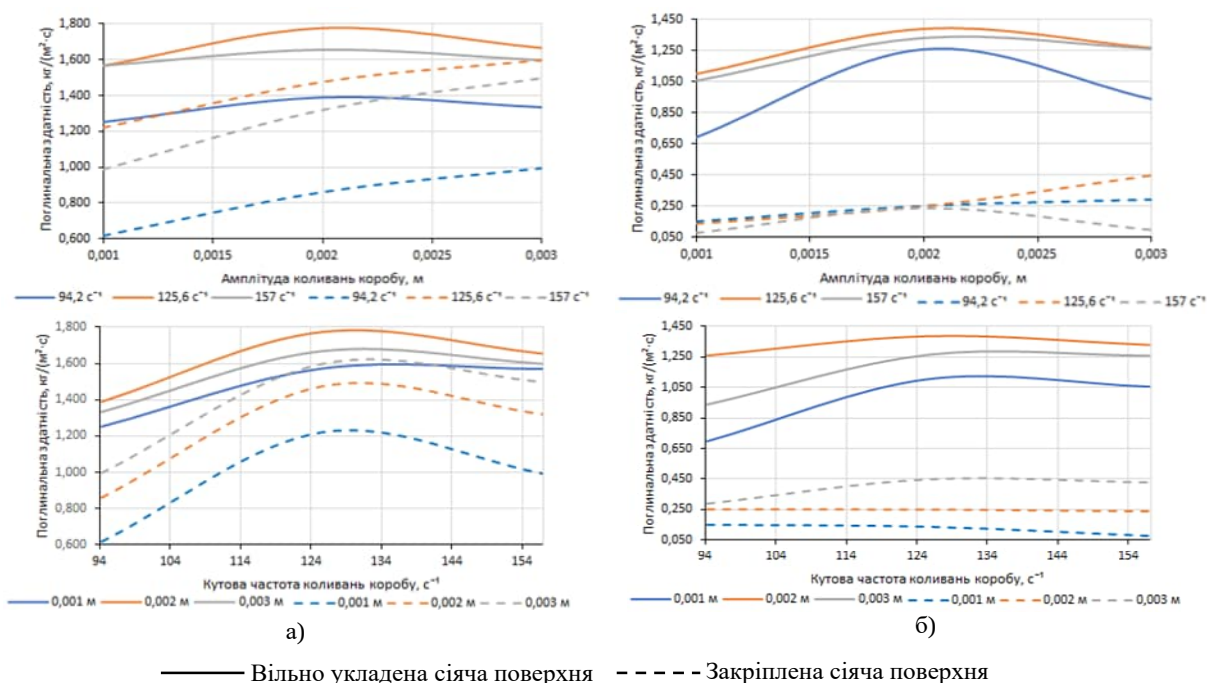
$$E = -43,345 + 46495 \cdot A + 1,279 \cdot \omega + 11,624 \cdot A \cdot \omega - 1,117 \cdot 10^7 \cdot A^2 - 0,005 \cdot \omega^2 \% \quad (23)$$

Одержана математична модель, що пов'язує ефективність грохочення вібраційно-ударної машини з невтримним зв'язком між ситом і коробом з амплітудою та кутовою частотою його вимушених коливань при 20 % рівні значності, дозволила встановити, що ефективність грохочення зростає за умови збільшення як амплітуди коливань коробу, так і її частоти, досягаючи свого максимуму у 92,6 % при амплітуді коливань 0,0022 м та частоті 125,6 с⁻¹, що відповідає прискоренню 35 м/с², причому, зміна амплітуди коливань коробу більше впливає на ефективність грохочення ніж частота.

Для оцінки дії динамічних параметрів коробу вібраційно-ударної машини з невтримним зв'язком між ним і ситом на поглинаючу здатність сіячої поверхні була проведена серія експериментів, де в якості матеріалу використовувався відсів агломерату, який поділявся на дві окремі навіски однакової маси з наступним грануломе-

тричним складом: I – 2...3 мм ($d_i/d_{\text{отв}} = 0,4 \dots 0,6$ – легкогροхотні частинки); II – 4...5 мм ($d_i/d_{\text{отв}} = 0,8 \dots 1$ – важкогрохотні частинки), задля вивчення відмінності перебігу процесу, дослід повторювався в умовах однакових динамічних параметрів коробу грохоту при закріпленій сіячій поверхні.

Аналіз отриманих функціональних залежностей поглинаючої здатності сіячої поверхні від амплітуди та кутової частоти коливань коробу з вільно укладеним та закріпленим ситом (рис. 21), які відображають, що вібраційно-ударна дія на матеріал, який транспортується по вільно укладеній сіячій поверхні, на відміну від закріпленої, призводить до збільшення її поглинальної здатності в середньому на 24,5 % для легкогрохотних та 77,8 % для важкогрохотних частинок, причому, при переході на важкогрохотний матеріал поглинаюча здатності сіячої поверхні зменшується в середньому на 26 %, максимальне значення поглинальної здатності в $1,78 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ набувається при амплітуді коливань у 0,0022 м, кутовій частоті 127 с^{-1} , що відповідає прискоренню $35,4 \text{ м}/\text{с}^2$.



а - легкогрохотні частинки (фракція 2...3 мм); б - важкогрохотні частинки (фракція 4...5 мм)

Рис. 21 Залежність поглинаючої здатності сіячої поверхні від амплітуди та кутової частоти коливань коробу

Таким чином, в розвиток теорії процесів грохочення експериментальним шляхом отримано залежності технологічних параметрів вібраційно-ударних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею від режимів коливань коробу (19)-(23), встановлено інтенсифікацію кожного з досліджуваних режимів порівняно з традиційною конструкцією, у якій сито жорстко закріплене до коробу грохота.

В п'ятому розділі розглянуті питання, пов'язані з працездатністю сіячої поверхні та амортизуючих пружних елементів в умовах дії вібраційно-ударних коливань.

Оскільки, порівняно з металевими ситами, питання тертя, зношення та експлуатаційного ресурсу полімерних сит досі залишаються недостатньо вивченими, для проведення досліджень в якості сіячої поверхні було обрано сито, виготовлене з по-

лімерного матеріалу, який широко застосовується в технологічних процесах металургійного виробництва, зокрема при сортуванні коксу, вапняку та коксового горішка.

За характером основного процесу знос сіячої поверхні, виготовленої з полімерів, може бути розділений на абразивний і втомний. При оцінці абразивного зносу полімерів використовується питома робота сил тертя на контакті «сіяча поверхня - шихтовий матеріал» за період коливань, яка пропорційна швидкості ковзання.

Задля уникнення необхідності врахування внутрішніх сил у шарі матеріалу, були прийняті такі припущення: залежність загасання амплітуд вертикальних та горизонтальних коливань у шарі є експоненційною та в діапазоні частот $\omega = 70 \dots 120 \text{ с}^{-1}$ зберігає постійне значення; при прослизанні матеріалу в будь-який момент часу сила тертя визначається законом Кулона (у нашому випадку це допустимо, тому що температурний режим постійний і не перевищує в середньому 50°C).

Рух елемента об'єму шару матеріалу щодо сіячої поверхні, нахиленої під деяким кутом α до горизонту, яка здійснює коливання по круговій траєкторії виконувався відповідно до розрахункової схеми (рис. 22).

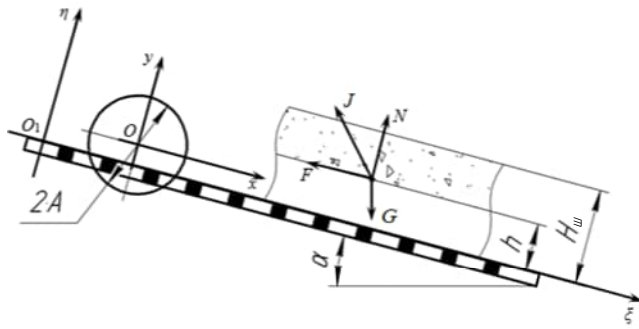


Рис. 22. Розрахункова схема

Враховуючи прийняті допущення та розрахункову схему, величина зношування сита по висоті його поверхні на контакті «сіяча поверхня - шихтовий матеріал» може бути визначена як

$$I = K_u \cdot A_\tau \text{ м}, \quad (24)$$

де K_u – коефіцієнт, що визначається експериментально для взаємодіючої пари «сіяча поверхня - шихтовий матеріал», $\text{м}^3/\text{Дж}$; A_τ – питома робота сили тертя під час роботи грохоту протягом τ годин

$$A_\tau = 3600 \cdot A_T \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot \tau \text{ Дж/м}^2, \quad (25)$$

де A_T – питома робота сили тертя на контакті «сіяча поверхня-шихтовий матеріал»

Окрім поверхневого зношування, відбувається зношування стінок отворів сита, через взаємодію потоку частинок, що проходять через нього. Приймаємо, що зношування стінок відбувається тільки за рахунок сил тертя на контакті «шихтовий матеріал - отвір сита» (у цьому випадку силами удару можна знехтувати), то величина такого зношування дорівнює

$$I'_{\text{ст}} = K_u \cdot A'_\tau, \quad (26)$$

де A'_τ – питома робота сил тертя під час роботи грохоту протягом τ годин, яка визначається

$$A'_\tau = 3600 \cdot A'_T \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot \tau, \text{ Дж/м}^2, \quad (27)$$

де A'_T – питома робота сил сухого тертя на контакті поверхні отвору сита з матеріалом за період коливань $\omega / (2 \cdot \pi)$;

$$A'_T = \left[\frac{m_0 \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}{\Pi \cdot \delta_{\text{сп}}} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \delta_{\text{сп}}} + A \cdot \omega \right) \right] \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi}, \text{ Дж/м}^2, \quad (28)$$

де m_0 – маса частинок, що знаходяться в отворі; $\delta_{\text{сп}}$ – товщина сіячої поверхні, м; n – кількість отворів в одиниці площі сита; Π – периметр отвору, м.

Для визначення терміну служби (необхідного на стадії проектування) сіячої поверхні, виготовленої з полімеру, можна розрахувати граничну кількість циклів n' деформації її поверхневих шарів, виходячи зі втомного руйнування матеріалу

$$n' = ([\sigma_0 \cdot \phi] / [3 \cdot f \cdot P])^{t^\circ} \text{ шт}, \quad (29)$$

де σ_0 – міцність полімеру, Па; ϕ – відносна площа фактичного контакту; P – тиск матеріалу на площу контакту, що дорівнює

$$N(t, h) = \rho \cdot S \cdot (H_{\text{ш}} - h) \cdot g \cos \alpha + \frac{\rho \cdot S \cdot A \cdot \omega^2}{\beta_g} \cdot \sin(\omega t) \times \\ \times (e^{-\beta_g \cdot H_{\text{ш}}} - e^{-\beta_g \cdot h}) \text{ Н/м}^2. \quad (30)$$

Таким чином, в розвиток триботехніки розроблено математичну модель прогнозування зносу (24), (26) та оцінки ресурсу експлуатації (29) сіячої поверхні, виготовленої з полімерного матеріалу, що функціонує в умовах металургійного виробництва.

Одним із важливих аспектів проектування вібраційних машин є вибір оптимальних параметрів пружних віброізолюючих елементів, які мають забезпечувати необхідний режим коливань робочого органу та ефективне зниження динамічних навантажень, що передаються на несучі конструкції або фундамент. Це потребує відповідного розподілу жорсткості пружних елементів за вертикальною та горизонтальною складовими. За результатами проведеного чисельного аналізу найбільш поширених залежностей з визначення горизонтальної жорсткості гвинтових циліндричних пружин, які використовуються при виборі віброізолюючих опор для вібраційних машин, встановлено, що існуючі розрахункові формули мають значну похибку, що може призводити до помилкового вибору конструктивних параметрів.

Виведення формули горизонтальної жорсткості гвинтових циліндричних пружин здійснювалось на основі розгляду роботи одного робочого витка пружини, навантаженого вертикальною P_v і горизонтальною P_r силами, які дорівнювали

$$P_v = m \cdot g \pm P_a \text{ Н}, \quad (31)$$

де m – маса грохоту, що припадає на одну пружину, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; P_a – активна збурювальна сила, що підпорядковується періодичному закону, Н;

$$P_r = \pm P_a \text{ Н}, \quad (32)$$

за розрахунковою схемою, наведеною на рис. 23.

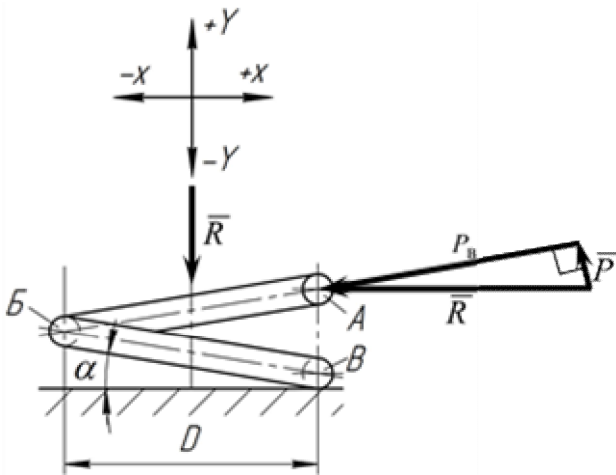


Рис. 23. Розрахункова схема витка

За результатами розрахунків одержано аналітичні залежності, які дають змогу визначити горизонтальну жорсткість пружинних елементів із витками круглого та прямокутного перерізів для вібраційних машин, що генерують вібраційно-ударні коливання

$$C'_x = \frac{E \cdot d}{2 \cdot k \cdot (4 \cdot k^2 + 1)} \text{ Н/м}; \quad (33)$$

$$C''_x = \frac{2 \cdot E \cdot h}{\pi \cdot k_1 \cdot (3 \cdot k_1^2 + 1)} \text{ Н/м}. \quad (34)$$

Це дозволяє порівнювати горизонтальну та вертикальну жорсткості під час проєктування та експлуатації вібраційної техніки.

Аналіз цих залежностей показав, що виготовлення гвинтової циліндричної пружини з однаковими горизонтальною та вертикальною жорсткостями є неможливим

$$C_x/C_y = 2 \cdot (1 + \mu) \quad (35)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

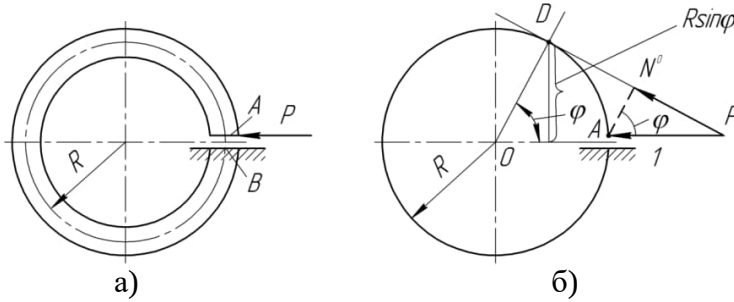


Рис. 24. Виток пружини у горизонтальній площині (а), розрахункова схема (б)

Враховуючи це, були проведені додаткові дослідження, спрямовані на визначення фактичних напружень у пружині під дією вібраційно-ударних навантажень, які спричиняють зміщення її опорних торців, виходячи з аналізу її роботи, у відповідності до схеми навантаження рис. 23 та розрахункової схеми рис. 24.

За результатами математичного опрацювання, виконаного згідно з прийнятими розрахунковими схемами, отримані аналітичні залежності, що описують напружений стан у гвинтових циліндричних пружинах вібраційних машин при зміщенні опорних торців. Діючі дотичні та нормальні напруження для пружин з індексом $k \leq 10$, визначаються за залежностями:

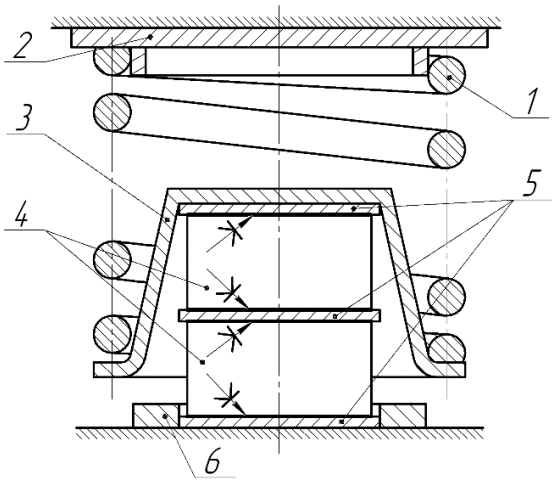
$$\sigma_1 = \pm [-(P/F) + P \cdot D \cdot z_1 / (S_{H.O} \cdot (D + d))] \text{ Па}; \quad (36)$$

$$\sigma_2 = \pm [-(P/F) - P \cdot D \cdot z_2 / (S_{H.O} (D - d))] \text{ Па}, \quad (37)$$

$$\tau = \pm \frac{16}{3} \cdot \frac{P}{\pi \cdot d^2} \text{ Па}, \quad (38)$$

де P – діюча сила, Н; d – діаметр дроту, м; F – площа перерізу, м²; D – середній діаметр витка, м; $S_{H.O}$ – статичний момент площі перерізу щодо нейтральної осі, м³; z_1 – відстань зовнішніх волокон від нейтральної осі, м; z_2 – відстань внутрішніх волокон від нейтральної осі, м.

Наведені залежності дозволяють обрати необхідну гвинтову пружину стиснення для вібраційної машини, що реалізують вібраційно-ударний режим, з урахуванням зсуву її опорних витків.



1 - гвинтова циліндрична пружина; 2 - опора; 3 - стакан; 4 - гумовий елемент; 5 - металева пластина; 6 - упорний стакан

Рис. 25. Гумове-пружинний амортизатор стискання-зсуву з рівними жорсткостями для вібраційних машин



Рис. 26. Грохот ГС-3,5×1



Рис. 27. Грохот ГСТ-61.МЗ

З метою забезпечення ефективного демпфування коливань у вібраційних машинах, що генерують різноманітні просторові коливання як під впливом вібраційно-ударних навантажень, так і примусових збуджень, було розроблено гумове-пружинний амортизатор стискання-зсуву з рівними жорсткостями (рис. 25) та методика його розрахунку. Запропонована конструкція амортизатора забезпечує результативне сприйняття та гасіння коливань у різних просторових напрямках.

В шостому розділі приведені результати промислових досліджень роботи вібраційно-сортувальних машин з сіячою поверхнею ударної дії. Метою яких було визначення впливу вібраційно-ударного режиму грохоту на його технологічні параметри, стабілізацію гранулометричного складу та механічної міцності частинок, а також сталості режиму коливань робочого органу.

Промислові випробування проводились в умовах: доменного цеху № 1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на двох вібраційних грохотах ГС-3,5×1 (рис. 26); агломераційної фабрики АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» на вібраційному грохоті гарячого агломерату ГСТ-61.МЗ (рис. 27), розроблених ТОВ «КВМШ плюс» у співпраці з кафедрою інжинірингу з галузевого машинобудування Державного університету економіки і технологій.

Дослідження проводились у два етапи за скороченим діапазоном варіювання факторів, що було обумовлено необхідністю не порушення технологічного регламенту.

На першому етапі виконувалось вивчення залежності технологічних характеристик грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.МЗ (транспортна про-

дуктивність, забиваність сіячої поверхні, ефективності грохочення) від величини їх динамічних параметрів, в якості котрих обирався комплексний показник, а саме прискорення коливань корпусу ($A \cdot \omega^2$) в межах 26...33 м/с². Кожне значення прискорень отримували при постійній амплітуді ($A = 0,003$ м) підбором відповідної величини частоти коливань ω за допомогою частотного перетворювача.

З отриманих залежностей (рис. 28) встановлено, що при реалізації вібраційно-

ударного режиму, який здійснюється за рахунок невимкнутого зв'язку між ситом і коробом, транспортна продуктивність грохоту зменшується на 17...56 %, забиваність сіячої поверхні в 6 разів, ефективність грохочення підвищується на 43 % у порівнянні з ординарним режимом за однакових динамічних параметрів.

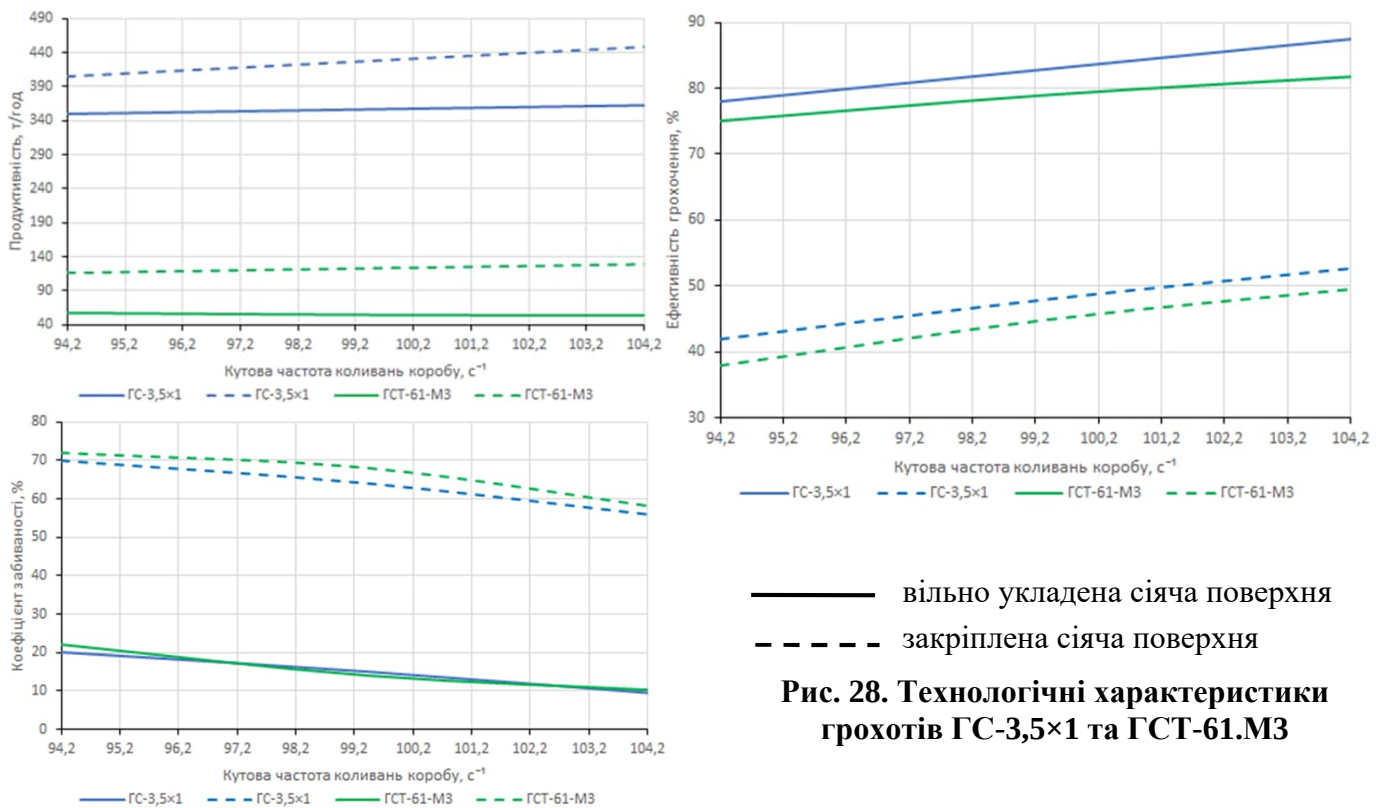


Рис. 28. Технологічні характеристики грохотів ГС-3,5х1 та ГСТ-61.МЗ

Отриманий результат підтверджує встановлений підчас аналітичних та лабораторних досліджень факт наявності особливого режиму галопування сіячої поверхні, так для забезпечення необхідної швидкості транспортування матеріалу, котрий розсипається, треба рухатись шляхом збільшення кута її нахилу.

На другому етапі виконувалась оцінка впливу ударної взаємодії матеріалу та сіячої поверхні з умови стабілізації гранулометричного складу агломерату шляхом порівняльної оцінки виходу фракції більше 5 мм після випробувань в барабані, да-

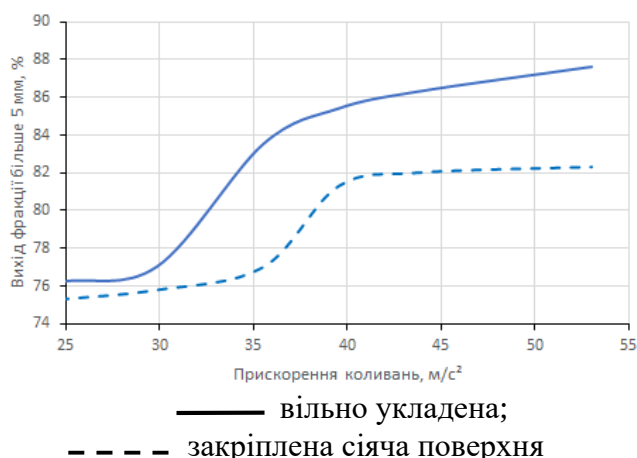


Рис. 29. Залежність виходу фракції більше 5 мм від прискорення коливань корпусу

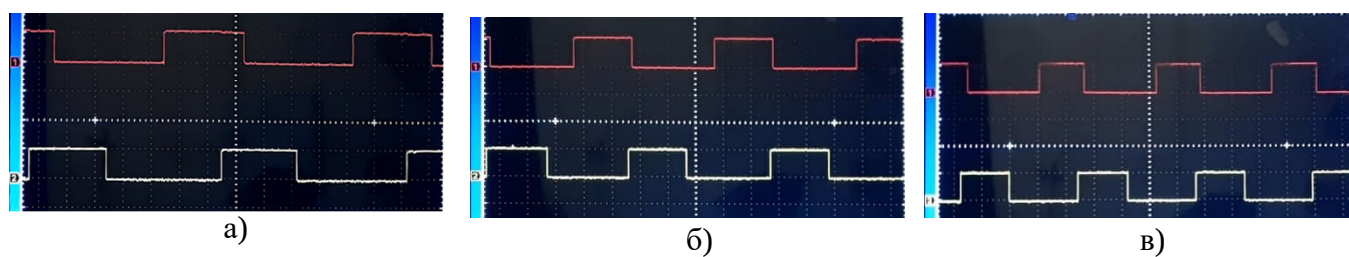
ний етап реалізовувався на вібраційному грохоті ГС-3,5х1 в діапазоні прискорень коливань корпусу $A \cdot \omega^2 = 25 \dots 44 \text{ м/с}^2$ при постійній амплітуді у $A = 0,004 \text{ м}$ та підборі відповідної величини частоти коливань ω за допомогою частотного перетворювача. Реалізація зазначеного діапазону прискорень на вібраційному грохоті ГСТ-61.МЗ з умови безпечної експлуатації була неможлива, тому стабілізація гранулометричного складу на ньому не досліджувалась.

За результатами промислових досліджень другого етапу, приведених на рис. 29,

встановлено, що при реалізації вібраційно-ударного режиму, який здійснюється за рахунок невідтворюваного зв'язку між ситом і коробом стабілізація гранулометричного складу інтенсивне протікає при прискореннях коливань коробу, які знаходяться в межах від 30 до 40 м/с², що дозволяє на 5 % зменшити вміст класу -5 мм в агломераті, підвищення якості залізистості частини шихти в умовах доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» дає річний економічний ефект у розмірі 11,5 млн. грн та високий коефіцієнт ефективності капіталовкладень у 1,37.

Враховуючи ударні навантаження від дії вільно укладеної сіячої поверхні з матеріалом, розташованим на ній, а також особливості формування навантаження вібраційних грохотів, працюючих в транспортно-технологічних лініях агломераційних фабрик, на протязі всієї реалізації програми експериментальних досліджень здійснювався контроль синфазності дебалансів вібраторів, який виконувався за допомогою фазових датчиків, сигнал від котрих надходив до багатоканального цифрового осцилографа DS1054 20.

В результаті чого були отримані осцилограми синфазності дебалансів вібраторів грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.МЗ у досліджуваному діапазоні прискорень коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 26 \dots 33$ м/с² (рис. 30) та залежність фазового зсуву дебалансів



а - 26,6 м/с²; б - 29,7 м/с²; в - 32,9 м/с²

Рис. 30. Осцилограми синфазності дебалансів вібраторів у досліджуваному діапазоні прискорень коливань коробу грохотів ГС-3,5×1 та ГСТ-61.МЗ

від прискорення коливань коробу (рис. 31), одержану шляхом екстраполяції даних, отриманих з осцилограм, з яких можна зробити висновок, що збільшення прискорення при сталій амплітуді коливань коробу на 11 % призводить до зменшення в середньому на 17 % кута взаємного фазового зсуву дебалансів підчас самосинхронізації вібраторів, що опосередковано підтверджує факт зменшення часу несталого руху

вільно укладеної сіячої поверхні зі збільшенням частоти коливань коробу за степеневим законом, та підтверджує адекватність отриманої в результаті теоретичних та скорегованої підчас лабораторних досліджень емпіричної залежності.

Окрім цього в промислових умовах виконано перевірку та підтверджено адекватність отриманих математичних моделей та аналітичних залежностей, встановлено, що помилка в результатах між розрахунковими та експериментальними значеннями коефіцієнта забиваності не

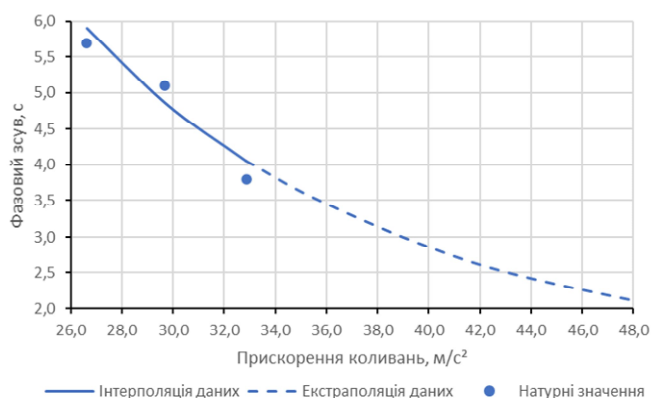


Рис. 31. Залежність фазового зсуву дебалансів від прискорення коливань коробу

перевищує 15 %, а прискорень коливань коробу, які відповідають інтенсивному протіканню процесу стабілізації – 12 %.

У даному розділі також на основі отриманих результатів досліджень розроблено та запропоновано ряд перспективних технічних рішень для вібраційних машин та їх опор, які призначені для класифікації та сортування залізорудної сировини перед її спіканням та плавкою.

ВИСНОВКИ

Представлена дисертація є закінченою кваліфікаційною науковою працею, в якій надано теоретичне узагальнення та нове рішення практичної актуальної наукової проблеми підвищення якості підготовки металургійних шихтових матеріалів до спікання і плавки шляхом розробки наукових основ створення вібраційних машин, що реалізують вібраційно-ударну дію на оброблюваний шар шихти, з урахуванням впливу конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів їх робочого органу на технологічні показники, що забезпечують підвищення ефективності фракціонування металургійної шихти перед процесами спікання та плавкою.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Аналіз науково-технічної інформації дозволив встановити, що у найближчій перспективі розвиток металургійної промисловості можливий лише за рахунок впровадження енергоефективних технологій, спрямованих на зниження операційних витрат. Найбільший потенціал економії криється в удосконаленні підготовки шихтових матеріалів, зокрема через ефективне грохочення та зменшення вмісту некондиційних фракцій. Перспективним є застосування вібраційних грохотів вібраційно-ударної дії з вільно укладеними сіячими поверхнями, які забезпечують самоочищення та стабілізацію гранулометричного складу металургійної шихти перед спіканням і плавкою. Водночас існує потреба в науково-обґрунтованих методиках розрахунку параметрів таких машин для їх широкого промислового впровадження.

2. Розроблено математичну модель руху сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі, сформованому швелероподібним підситником, яка враховує конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також геометричні характеристики сіячої поверхні та механічні властивості матеріалу з якого вона виготовлена, встановлено, що сталість коливань сіячої поверхні забезпечується коли відношення розміру проміжку між нижньою та верхньою площинами підситника до максимальної амплітуди коливань її матеріальної точки є меншим за одиницю, при збільшенні частоти коливань коробу час етапу несталого руху зменшується за степеневим законом, при цьому, наближення значень власної частоти пружних коливань сіячої поверхні до вимушеної частоти її коливань їх характер приймає квазігармонійний вид зі зростанням амплітуди та коефіцієнту динамічності, а при збільшенні кута вібрації точок коробу від 40° до 50° середня амплітуда коливань матеріальної точки сіячої поверхні зменшується за поліноміальним законом другого порядку.

3. Встановлено, що геометричні розміри сіячої поверхні, вільно укладеної в просторі, сформованому швелероподібним підситником, є незалежним фактором, який впливає на потенційну та кінетичну енергії для обох форм деформації поступа-

льного та обертового рухів, а поворотне-обертовий є переважальним режимом її руху при динамічних стійких лінійно направлених гармонічних коливаннях коробу.

4. Отримана аналітична залежність, котра визначає розмір частинки матеріалу, більше котрого заклинювання не відбувається, в залежності від апертури сіячої поверхні її фізичних властивостей та матеріалу, що розсівається, встановлено, що в отворі сита здатні заклинюватись частинки, розмір котрих в 1...1,4 рази більше розміру отвору, причому більше значення відповідає максимальному значенню коефіцієнта тертя.

5. Отримані теоретичні залежності, які визначають силу заклинювання частинки матеріалу, що розсівається, граничну висоту її підкидання більше котрої не відбувається її заклинювання в отворі сита, в залежності від апертури сіячої поверхні її фізичних властивостей та матеріалу, який розсівається, з'ясовано, що мінімально необхідна висота підкидання частинки зі збільшенням коефіцієнту тертя зменшується, а сама залежність описується степеневою функцією.

6. Розроблено математичну модель процесу очищення сіячої поверхні вільно укладених в просторі підситника вібруючого коробу, в результаті чого отримані умови евакуації частинки матеріалу, що заклинилися, з отворів сіячої поверхні з урахуванням фізичних властивостей матеріалу, що розсівається, та сіячої поверхні, апертури сита, його конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів, встановлено, що при збільшенні коефіцієнта тертя матеріалу, що розсівається, о сіячу поверхню прискорення необхідне для самоочищення збільшується, а швидкість частинки в момент відриву від сіячої поверхні зменшується, натомість, при збільшенні кутів вібрації та нахилу сіячої поверхні необхідні для самоочищення як прискорення, так і швидкість зменшуються.

7. Розроблено математичну модель, яка описує процес руху частинки матеріалу, що розсівається, по сіячій поверхні, вільно укладених в просторі підситника вібруючого коробу, встановлено, що зі збільшенням прискорення коливань коробу грохоту середня швидкість руху та прискорення частинки матеріалу, що розсівається, на першому етапі, середня висота підкидання частинки та період її вільного руху на другому етапі збільшуються, стає зростання зазначених параметрів відбувається в діапазоні прискорень коробу від 18,5 до 32,9 м/с².

8. Встановлено, що стабілізація гранулометричного складу агломерату та механічної міцності частинок надрешітного продукту фракцією 5...40 мм шляхом їх руйнування по концентраторах напруження на сіячій поверхні, вільно укладених в просторі підситника вібруючого коробу, відбувається за умови забезпечення прискорення його коливань в межах від 32,9 до 47,3 м/с² при постійній амплітуді $A = 0,003$ м.

9. Експериментально встановлено залежності технологічних параметрів вібраційно-ударних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею від режимів коливань коробу, визначено ефективність кожного з досліджуваних режимів порівняно з традиційною конструкцією із жорстко закріпленим ситом, а також встановлено, що раціональні значення прискорення коливань коробу знаходяться в межах 28...35 м/с² за амплітуди 0,002 м.

10. Розроблено математичну модель прогнозування зносу та оцінки строку експлуатації сіячої поверхні, виготовленої з полімерного матеріалу, що працює в умовах металургійного виробництва, в залежності від конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів грохоту, а також її геометричних характеристик та фізичних властивостей матеріалу з якого вона виготовлена.

11. На основі теоретичних досліджень отримано аналітичну залежність для визначення горизонтальної жорсткості пружинних елементів із витками круглого та прямокутного перерізів у вібраційних машин, що генерують вібраційно-ударні коливання, на підставі якої розроблено методики обґрунтованого вибору гвинтових циліндричних пружини стискання з урахуванням зсуву їх опорних витків, та розрахунку гумово-пружного амортизатора стискання-зсуву з рівною жорсткістю, який забезпечує підвищену надійність та ефективність роботи в умовах вібраційно-ударних навантажень.

12. За результатами промислових випробувань встановлено, що при реалізації вібраційно-ударного режиму, який здійснюється за рахунок невідтворюваного зв'язку між ситом і коробом, транспортна продуктивність грохоту зменшується на 17...56 %, забиваність сіячої поверхні в 6 разів, ефективність грохочення підвищується на 43 % у порівнянні з ординарним режимом за однакових динамічних параметрів, стабілізація гранулометричного складу інтенсивне протікає при менших прискореннях коливань коробу, які знаходяться в межах від 30 до 40 м/с², що дозволяє на 5 % зменшити вміст класу -5 мм в агломераті, це дає річний економічний ефект у розмірі 11,5 млн. грн. Також виявлено, що збільшення прискорення при сталій амплітуді коливань коробу на 11 % призводить до зменшення в середньому на 17 % кута взаємного фазового зсуву дебалансів під час самосинхронізації вібраторів, що опосередковано підтверджує факт зменшення часу несталого руху вільно укладеної сіячої поверхні зі збільшенням частоти коливань коробу за степеневим законом, це підтверджує адекватність отриманої в результаті теоретичних та скорегованої під час лабораторних досліджень емпіричної залежності.

13. Отримані результати знайшли практичне застосування:

- шляхом впровадження в технологічних лініях шихтоподачі доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» грохотів агломерату ГС-3,5×1 та встановлення впливу вібраційного та вібраційно-ударного режимів на його основні технологічні параметри;
- шляхом використання на підприємстві ТОВ «КВМШ плюс» рекомендацій щодо вибору основних конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів вібраційних машин з сіячою поверхнею вібраційно-ударної дії;
- шляхом впровадження на АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» результатів дисертаційної роботи, які пов'язані з описом динамічного стану технічної системи, що сприймає вібраційно-ударні навантаження, під час завантаження та транспортування шихтового матеріалу та корегуванні режимів його роботи;
- отриманні теоретичні та експериментальні дані впроваджені в навчальний процес Навчально-наукового технологічного інституту Державного

університету економіки і технологій при підготовці здобувачів освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за галуззю знань G Інженерія, виробництво та будівництво, спеціальності G11 Машинобудування (за спеціалізаціями) при вивченні освітніх компонент: інженерний аналіз механічного обладнання для підготовчих процесів гірничо-металургійної галузі; планування лабораторних, експериментально-промислових досліджень; використання інформаційних систем в науково-дослідницькій діяльності.

14. Достовірність отриманих результатів підтверджена як лабораторними, так і промисловими дослідженнями, встановлено, що середнє відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями показників динамічного стану системи не перевищує $\pm 8,5$ %, значення прискорення, яке забезпечує максимальне самоочищення, виявилось меншим за розрахункове на 8 %, при використанні фракції меншої за граничне значення заклинювання частинками матеріалу отворів сіячої поверхні досягає 81 %, що підтверджує достовірність визначеного граничного розміру частинок, більших за який заклинювання не відбувається, похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями коефіцієнта забиваності не перевищує 15 %, а для прискорень коливань коробу, що відповідають інтенсивному протіканню процесу стабілізації – 12 %. Також підтверджено, що за динамічне стійких лінійно спрямованих гармонійних коливань коробу сито здійснює поворотне-обертальний (голопуючий) рух, тоді як зростання енергетики процесу призводить до переходу на зворотне-поступальний характер руху.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і коксосортування металургійного виробництва: монографія / В. Й. Засельський, Д. В. Пополов та ін. Кривий Ріг: Літерія, 2019. 203 с. ISBN 978-617-7643-53-0
2. Учитель С. А., Лялюк В. П., Пополов Д. В. Сортировка металлургических шихт на вибрационных грохотах. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 с. ISBN 978-3-639-68645-6
3. Большаков В. И., Учитель А. Д., Пополов Д. В. Расчет металлургических машин. Оборудование обжиговых и агломерационных цехов: руководство для инженеров-конструкторов. Кривой Рог: Дионис, 2012. 338 с. ISBN 978-966-2311-82-2

Статті, що входять до міжнародної науково-метричної бази Scopus

4. Zaselskiy V., Popolov D., Zaselskiy I. Theoretical determination of wear and lifetime of the screen sowing surface. *Vibrations in physical systems*. 2017. Vol. 28. 2017008. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85039855847&origin=recordpage>
5. Studying of movement kinematics of dynamically active sieve / D. Popolov et al. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 23, no. 1. P. 94–97. DOI: 10.2478/mme-2019-0013.
6. Zaselskiy V. I., Popolov D. V., Zaytsev G. L. Steeply inclined vibrational screen in coal

preparation at coke plants. *Coke and chemistry*. 2020. Vol. 63, no. 7. P. 351–355. DOI: 10.3103/S1068364X20070078

7. Zaselskiy V. I., Popolov D. V., Ivanov I. G. Preparation of coking batch in vibrational impact equipment. *Coke and chemistry*. 2021. Vol. 64, no. 4. P. 163–168. DOI:10.3103/S1068364X21040098
8. Zaselskiy V., Popolov D., Zaytsev H. Upgrade of conveyor line for coal charge preparation with the use of modern grading-and-mixing equipment // *Science and Innovation*. 2021., No. 3 Vol. 17. P. 67–77. DOI:10.15407/scine17.03.067
9. Model of material movement on the working surface of a vibrating machine / V. Zaselskiy, D. Popolov et al. *Rakenteiden mekaniikka*. 2024. Vol. 57, no. 4. P. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.23998/rm.136058>

Статті у наукових фахових виданнях

10. К расчету горизонтальной жесткости винтовых цилиндрических пружин / Д. В. Пополов та ін. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2017. № 35. С. 110–117.
https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/125162/119651
11. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Лабораторні дослідження динамічного стану жорсткої сіячої поверхні, діючої в вібраційно-ударному полі. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 1(49), 152–160. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321237>
12. Особенности формирования нагрузки вибрационных грохотов, работающих в транспортно-технологических линиях агломерационных фабрик / Д. В. Пополов та ін. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. №. 5 (277). С. 72–74.
13. Засельский В. И., Пополов Д. В., Засельский И. В. Повышение надежности работы грохотов агломерата, работающих в трактах шихтоподготовок доменных цехов. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 7. С. 215–219.
14. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Лабораторні дослідження внутрішньосферних процесів в шихтових матеріалах при впливі вібраційно-ударної дії. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 1. С. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2023.10>
15. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Лабораторні дослідження ефективності грохочення залізовмісної сировини на грохоті з вільно укладеною сіячою поверхнею. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 2. С. 51–57.
DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2023.08>
16. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Перспективні конструкції грохотів для підвищення якості підготовки шихтових матеріалів перед спіканням і плавкою. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 3. С. 15–21.
DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2023.03>
17. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Математична модель руху сіячої поверхні грохоту в умовах її ударно-вібраційної дії. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 4. С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2023.04>
18. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Визначення важливих чинників енергоємності у процесі доменного. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 1. С. 13–20.
DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2024.02>

19. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Визначення деформації жорсткої сіячої поверхні в умовах ударно-вібраційної дії. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 2. С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2024.07>
20. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Дослідження заклинювання частинок матеріалу у отворах вільно укладеної сіячої поверхні вібраційного грохота. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 3. С. 61–68.
DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2024.08>
21. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Дослідження умов стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти при вібраційно-ударній її обробки. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 4. С. 18–24.
DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2024.03>
22. Zaselskyi V., Popolov D. Laboratory studies on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening. *Теорія і практика металургії*. 2025. No. 1. P. 60–65.
DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.1.2025.08>

Матеріали наукових конференцій

23. Учитель А. Д., Засельский В. Й., Пополов Д. В. Анализ формирования гранулометрического состава шихтового материала на тракте его подачи в доменную печь // *XIII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании»*: Варна, 5–8 черв. 2017 р. Т. 2. С. 224–227.
24. Засельский В. И., Пополов Д. В., Учитель С. А. Исследования разрушений элементов конструкций тяжело нагруженных вибрационных грохотов большого типоразмерного ряда. *Механіка машин - основна складова прикладної механіки*: Матеріали Всеукр. науково-техн. конф., м. Дніпро, 11–13 квіт. 2017 р. Дніпро, 2017. С. 27–30.
25. Засельский В. И., Пополов Д. В., Коноваленко В. В. Определение напряжений в винтовых цилиндрических пружинах вибрационных машин при смещении опорных торцов. *XIV Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании»*: Матеріали міжнар. наук. конф., м. Варна, 4–7 черв. 2018 р. Дніпро, 2018. С. 66–71.
26. Засельский В. Й., Пополов Д. В., Засельский И. В. Повышение надежности работы грохотов агломерата, работающих в трактах шихтоподготовок доменных цехов. *Міжнародна конференція «Надійність та динаміка важких машин»*: Матеріали міжнар. наук. конф., м. Дніпро, 30 жовт. 2018 р. Дніпро, 2018. С. 215–219.
27. Засельский В. И., Пополов Д. В. Обоснование использования вибрационно-ударных машин для классификации металлургической шихты. *Потураєвські читання*: тези XIX Всеукр. Науково-техн. Конф., м. Дніпро, 22 квіт. 2021 р. Дніпро, 2021. С. 47–48.
28. Zaselskyi V., Popolov D. Investigation of intralayer processes during material processing on vibratory-impact screens. *V International scientific congress «Society of ambient intelligence 2022»*: Матеріали міжнародної наукової конференції, Кривий Ріг, 17–21 October 2022.
29. Zaselskyi V., Popolov D. Research of factors that have a significant impact on the energy intensity of blast furnace production. *VI International scientific congress «Society*

of ambient intelligence 2023»: Матеріали міжнародної наукової конференції, Кривий Ріг, 20–25 November 2023.

30. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Теоретичні дослідження процесу забивання сіячої поверхні вібраційних грохотів. *XVIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті*»: Матеріали міжнар. наук. конф., м. Варна, 3–6 черв. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 39–43.
31. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Математична модель процесу заклинювання частинок матеріалу в отворах сіячої поверхні вібраційного грохоту. *VII Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід*»: Матеріали міжнар. наук. конф., м. Гельсінкі, 23–25 груд. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 114–119.
32. Zaselskyi V., Popolov D., Shved S. Assessment of the Deformation of a Rigid Seeding Surface Under the Impact of Shock-Vibration Action. *VII International scientific congress «Society of ambient intelligence 2024*»: Матеріали міжнародної наукової конференції, Кривий Ріг, 2–6 December 2024.

Патенти

33. Вібраційний грохот: пат. 122940 Україна: B07B 1/40, 1/46. № u201710088; заявл. 18.10.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.
34. Вібраційний грохот: пат. 141145 Україна: B07B1/40, 1/46. № u201908854; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.
35. Гумово-пружинний амортизатор стискання-зсуву з рівними жорсткостями для вібраційних машин: пат. 140796 Україна: F16F3/12, B07B1/46. № u201908858; заявл. 22.07.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.
36. Вібраційний грохот: пат. 91901 Україна: B07B 1/40. № u201314745 ; заявл. 16.12.2013; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. 4 с.
37. Вібраційний грохот для сортування сипких матеріалів: пат. 91902 Україна: B07B 1/40. № u 201314747; заявл. 16.12.2013; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 4. 5 с.
38. Вібраційний живильник: пат. 47387 Україна: 865G 27/00. № u200909588; заявл. 18.09.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2. 5 с.
39. Вібраційний грохот-живильник: пат. 158496 Україна : B07B 1/00, B07B 1/40, B65G 27/00, B65G 27/10, B65G 27/34. № u202404143 ; заявл. 19.08.2024; опубл. 12.02.2025, Бюл. № 7. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Пополов Д. В. Розробка наукових основ створення вібраційно-ударних машин для металургійного виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.08 «Машини для металургійного виробництва». – Державний університет економіки і технологій, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми підвищення якості підготовки металургійних шихтових матеріалів до спікання і плавки шляхом розробки наукових основ створення вібраційних машин, що реалізують віб-

раційно-ударну дію на оброблюваний шар шихти, з урахуванням впливу конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів їх робочого органу на технологічні показники, що забезпечують підвищення якості фракціонування металургійної шихти перед процесами спікання та плавки.

Вперше встановлено, що сталість коливань сіячої поверхні вільно укладеної в просторі, утвореним швелероподібним підситником, досягається при відношенні розміру проміжку між нижньою та верхньою площинами підситника до максимальної амплітуди коливань її матеріальної точки меншим за одиницю, а при збільшенні частоти коливань коробу час етапу її несталого руху зменшується за степеневим законом, що теоретично обґрунтовано на підставі розробленої математичної моделі, враховуючи конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також геометричні характеристики, механічні властивості матеріалу самої сіячої поверхні, яка підтверджена експериментально-практичними дослідженнями.

Розвинені теоретичні уявлення щодо характеристик динамічних залежностей вільно укладеної сіячої поверхні вібраційного грохота, встановлено, що при наближенні значень власної частоти її пружних коливань до вимушених, їх характер приймає квазігармонійний вид, а при збільшенні кута вібрації точок коробу від 40° до 50° середня амплітуда коливань матеріальної точки сіячої поверхні зменшується за поліноміальним законом другого порядку. Вперше встановлено, що геометричні розміри сіячої поверхні є незалежним фактором, який впливає на потенційну та кінетичну енергії для обох форм деформації поступального і обертального рухів, а поворотне-обертальний є переважальним режимом її роботи при динамічне стійких лінійно направлених гармонійних коливаннях коробу.

Вперше отримано практично підтверджену аналітичну залежність, яка визначає розмір частинки матеріалу, більше якої заклинювання не відбувається, в залежності від апертури сіячої поверхні, її фізичних властивостей та виду матеріалу, що розсівається, на основі якої встановлено, що в отворі сита здатні заклинюватись частинки, розмір яких в 1...1,4 рази більше розміру отвору, причому більше значення відповідає максимальному значенню коефіцієнта тертя.

Вперше отримані експериментально підтверджені теоретичні залежності, які визначають силу заклинювання частинки, а також граничну висоту її підкидання, більше якої не відбувається її заклинювання в отворі сита та з'ясовано, що в залежності від апертури сіячої поверхні її фізичних властивостей та матеріалу, який розсівається, мінімально необхідна висота підкидання частинки зі збільшенням коефіцієнту тертя зменшується, а сама залежність описується степеневою функцією.

Вперше теоретично обґрунтовано умови евакуації частинки матеріалу, що заклинилися, з отворів сіячої поверхні вільно укладеної в просторі підситника вібруючого коробу з урахуванням фізичних властивостей матеріалу, що розсівається, апертури сита, його конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів, на підставі практично підтвердженої математичної моделі процесу очищення сіячої поверхні.

Вперше розроблено математичну модель, яка описує процес руху частинки матеріалу, що розсівається, по сіячій поверхні, вільно укладеної в просторі підситника вібруючого коробу, та встановлено, що зі збільшенням прискорення коливань коробу грохоту середня швидкість руху та її прискорення на початковому етапі, як і середня

висота підкидання та період її вільного руху на другому етапі, збільшуються.

Теоретичне обґрунтовано та експериментально підтверджено, що необхідна ефективність процесу стабілізації гранулометричного складу агломерату та механічної міцності частинок надрешітного продукту фракцією 5...40 мм шляхом їх руйнування по концентраторах напруження на сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, досягається за умови прискорення його коливань в межах від 32,9 до 47,3 м/с² при сталій амплітуді $A = 0,003$ м.

В розвиток теорії процесів грохочення експериментальним шляхом отримано залежності технологічних параметрів вібраційно-ударних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею від режимів коливань коробу, встановлено інтенсифікацію кожного з досліджуваних режимів порівняно з традиційною конструкцією, у якій сито жорстко закріплене до коробу грохота.

В розвиток триботехніки розроблено математичну модель прогнозування зносу та оцінки ресурсу експлуатації сіячої поверхні, виготовленої з полімерного матеріалу, що функціонує в умовах металургійного виробництва.

Використання отриманих результатів дозволило: розробити методику розрахунку конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів вібраційних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею, розміщеною у просторі, утвореному швелероподібним підситником; розробити методику розрахунку параметрів вібраційно-ударного режиму, необхідних для стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти перед завантаженням її до доменної печі; визначити горизонтальну жорсткість пружинних елементів із витками круглого та прямокутного перерізів для вібраційних машин, що генерують вібраційно-ударні коливання; розробити методику розрахунку, яка дозволяє обґрунтовано вибирати гвинтові циліндричні пружини стискання для вібраційних машин з урахуванням зсуву їх опорних витків; запропонувати конструкцію та методику розрахунку гумове-пружного амортизатора стискання-зсуву з рівними жорсткостями, який забезпечує підвищену надійність та працездатність вібраційних машин, що працюють у режимі вібраційно-ударних навантажень; запропонувати нові технічні рішення, які дали змогу інтенсифікувати процес підготовки металургійних шихтових матеріалів фракціонуванням перед спіканням та плавою.

Отримані результати знайшли практичне застосування: шляхом впровадження в технологічних лініях шихтоподачі доменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» грохотів агломерату ГС-3,5×1 та встановлення впливу вібраційного та вібраційно-ударного режимів на його основні технологічні параметри; шляхом використання на підприємстві ТОВ «КВМШ плюс» рекомендацій щодо вибору основних конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів вібраційних машин з сіячою поверхнею вібраційно-ударної дії; шляхом впровадження на АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» результатів дисертаційної роботи, які пов'язані з описом динамічного стану технічної системи, що сприймає вібраційно-ударні навантаження, під час завантаження та транспортування шихтового матеріалу та корегуванні режимів його роботи.

Ключові слова: вібраційний грохот, сіяча поверхня, вільно укладена, металургійна сировина, аглодоменне виробництво, гранулометричний склад, вібраційно-

ударний імпульс, зношення, полімер, чисельне моделювання, контактний тиск.

ABSTRACT

Popolov D. V. Development of scientific foundations for the creation of vibration-impact machines for metallurgical production. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.05.08 “Machines for Metallurgical Production”. – State University of Economics and Technology, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem of improving the quality of preparation of metallurgical burden materials for sintering and smelting by developing scientific foundations for creating vibrating machines that implement a vibration-impact effect on the processed burden layer, taking into account the influence of the structural, kinematic and dynamic parameters of their working body on the technological indicators that ensure improved quality of fractionation of the metallurgical burden before the processes of sintering and smelting.

For the first time, it was established that the stability of oscillations of the screening surface freely laid in space, formed by a channel-shaped sub-screen, is achieved when the ratio of the gap between the lower and upper planes of the sub-screen to the maximum amplitude of oscillation of its material point is less than one, and when the oscillation frequency of the casing increases, the duration of its transient motion stage decreases according to a power law, which is theoretically substantiated on the basis of the developed mathematical model, taking into account the structural, kinematic and dynamic parameters of the screen, as well as the geometric characteristics and mechanical properties of the material of the screening surface itself, which is confirmed by experimental and practical studies.

Theoretical ideas about the characteristics of the dynamic dependencies of the freely laid screening surface of the vibrating screen have been developed; it has been established that when the values of the natural frequency of its elastic oscillations approach the forced ones, their character takes on a quasi-harmonic form, and when the vibration angle of the casing points increases from 40° to 50° , the average amplitude of oscillation of the material point of the screening surface decreases according to a second-order polynomial law.

For the first time, it was established that the geometric dimensions of the screening surface are an independent factor influencing the potential and kinetic energy for both forms of deformation – translational and rotational movements, and that the rotational-translational mode is the dominant mode of its operation under dynamically stable linearly directed harmonic oscillations of the casing.

For the first time, a practically confirmed analytical dependence was obtained, which determines the size of the material particle above which jamming does not occur, depending on the aperture of the screening surface, its physical properties and the type of material being screened, based on which it was established that particles whose size is 1...1.4 times greater than the aperture size can jam in the screen opening, with the higher value corresponding to the maximum value of the coefficient of friction.

For the first time, experimentally confirmed theoretical dependencies were obtained that determine the jamming force of a particle, as well as the critical height of its throwing, above which its jamming in the screen opening does not occur, and it was found that depending on the aperture of the screening surface, its physical properties and the material being screened, the minimum necessary height of particle throwing decreases with an increase in the coefficient of friction, and the dependence itself is described by a power function.

For the first time, the conditions for the evacuation of a jammed material particle from the openings of the screening surface freely laid in the space of the sub-screen of the vibrating casing were theoretically substantiated, taking into account the physical properties of the material being screened, the screen aperture, its structural, kinematic and dynamic parameters, based on a practically confirmed mathematical model of the screening surface cleaning process.

For the first time, a mathematical model was developed describing the movement process of a material particle being screened on the screening surface freely laid in the space of the sub-screen of the vibrating casing, and it was established that with an increase in the oscillation acceleration of the screen casing, the average movement speed and its acceleration at the initial stage, as well as the average throwing height and the period of its free movement at the second stage, increase.

It was theoretically substantiated and experimentally confirmed that the necessary efficiency of the process of stabilizing the granulometric composition of the agglomerate and the mechanical strength of the particles of the oversize product in the 5...40 mm fraction by their destruction at stress concentrators on the screening surface freely laid in the space of the sub-screen of the vibrating casing is achieved under the condition of acceleration of its oscillations in the range from 32.9 to 47.3 m/s² at a constant amplitude $A = 0.003$ m.

As a development of the theory of screening processes, technological parameter dependencies of vibration-impact machines with a freely laid screening surface on the oscillation modes of the casing were obtained experimentally, and the intensification of each of the studied modes was established in comparison with the traditional design in which the screen is rigidly fixed to the screen casing. As a development in the field of tribotechnics, a mathematical model was developed for predicting wear and assessing the service life of the screening surface made of polymer material, functioning under metallurgical production conditions.

The use of the obtained results made it possible: to develop a methodology for calculating the structural, kinematic and dynamic parameters of vibrating machines with a freely laid screening surface placed in a space formed by a channel-shaped sub-screen; to develop a methodology for calculating the parameters of the vibration-impact mode necessary for stabilizing the granulometric composition of the metallurgical burden before loading it into the blast furnace; to determine the horizontal stiffness of spring elements with round and rectangular wire cross-sections for vibrating machines generating vibration-impact oscillations; to develop a calculation methodology that allows the justified selection of helical cylindrical compression springs for vibrating machines taking into account the displacement of their support coils; to propose a design and calculation methodology

of a rubber-elastic compression-shear damper with equal stiffnesses, which ensures increased reliability and efficiency of vibrating machines operating in the vibration-impact loading mode; to propose new technical solutions that made it possible to intensify the process of preparing metallurgical burden materials by fractionation before sintering and smelting.

The obtained results found practical application: by implementing GS-3.5×1 agglomerate screens in the burden feeding technological lines of blast furnace production at PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih» and determining the effect of vibration and vibration-impact modes on its main technological parameters; by using at the enterprise LLC «KVMSH Plus» recommendations on the selection of basic structural, kinematic and dynamic parameters of vibrating machines with a vibration-impact screening surface; by implementing at PJSC «Southern Mining and Processing Plant» the results of the dissertation work related to the description of the dynamic state of the technical system that perceives vibration-impact loads during the loading and transportation of burden material and adjusting its operating modes.

Keywords: vibrating screen, screening surface, freely laid, metallurgical raw materials, sintering and blast furnace production, granulometric composition, vibration-impact impulse, wear, polymer, numerical modeling, contact pressure.

Пополов Дмитро Володимирович

**Розробка наукових основ створення вібраційно-ударних машин
для металургійного виробництва**

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва

Підписано до друку 03.09.2025

Формат 60×84/16. Ум. друк арк. 3,4. Авт. арк 2,1

Тираж 100 прим.

Друкарня «Літерія»

вул. Вахи Арсанова, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027

тел. 097-192-20-77

Свідоцтво про реєстрацію суб'єкта видавничої діяльності ДК № 4561 від 13.06.2013