ВІДГУК

офіційного опонента Баюла Костянтина Васильовича
на дисертаційну роботу Пополова Дмитра Володимировича
«Розробка наукових основ створення вібраційно-ударних машин
для металургійного виробництва»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва

1. Актуальність теми дисертації

В умовах посилення глобальних вимог щодо декарбонізації промисловості та скорочення викидів CO_2 особливого значення набуває модернізація енергоємних технологічних процесів металургійного виробництва. Оскільки якість підготовки шихтових матеріалів фракціонуванням безпосередньо впливає на газодинамічні показники доменної плавки, витрати коксу та обсяг шкідливих викидів, удосконалення технологій їх розсіву є важливим кроком до зменшення вуглецевого сліду виробництва. У цьому контексті розробка вібраційних грохотів із вібраційно-ударною дією, що реалізується завдяки вільно укладеної сіячої поверхні, здатних забезпечувати більш ефективне вилучення некондиційних фракцій та, як наслідок, зниження енергоємності виробництва, відповідає сучасним екологічним і технологічним викликам, що підкреслює наукову й практичну актуальність проведених у дисертаційній роботі досліджень.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Виконані дослідження та отримані результати узгоджуються з науковою тематикою кафедри інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій, де виконувалась робота, та відповідає абзацу другому статті 2 Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності», у якому визначено завдання формування ефективного сектору наукових досліджень і науково-технічних розробок для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняного виробництва та його сталого розвитку. Окремі розділи даної роботи виконано в рамках 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.

3. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота є закінченою кваліфікаційною науковою працею, яка складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота має загальний обсяг 330 сторінок, містить додатки на 39 сторінках, 106 ілюстрацій, 8 таблиць. Загальна кількість використаних джерел складається з 330 найменувань.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної наукової проблематики, визначено взаємозв'язок тематики дослідження з державними науковими програмами і планами, сформульовано мету та основні завдання, окреслено об'єкт і предмет дослідження, а також методологічну базу. Подано характеристику наукової новизни й практичного значення отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію основних положень, публікації за темою дисертації, а також структуру і загальний обсяг роботи.

Перший розділ містить аналіз сучасного стану металургійної галузі з акцентом на чинники, що зумовлюють високу енергоємність коксохімічного та доменного переділів. Детально досліджено роль гранулометричного складу шихти у формуванні газодинамічних умов плавки, витратах коксу та рівні шкідливих викидів. Автором виявлено обмеження існуючих вібраційних грохотів у забезпеченні ефективного вилучення некондиційних фракцій, що знижує ефективність металургійних процесів. У цьому контексті обґрунтовано доцільність створення вібраційно-ударних машин з вільно укладеною сіячою поверхнею, здатною до самоочищення, зменшення забиваності та стабілізації гранулометричного складу, що формує концептуальну основу подальших досліджень.

У **другому розділі** представлено результати теоретичного моделювання динамічного стану сита під дією вібраційно-ударних навантажень за допомогою розробленої математичної моделі, яка враховує конструктивні, кінематичні та динамічні параметри грохоту, а також фізико-механічні характеристики сита. Автором розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати

чисельні експерименти з моделювання руху системи «короб-сито» у різних режимах. Встановлено закономірності впливу прискорення, частоти та амплітуди коливань на траєкторію і характер руху сита, зокрема наявність зворотно-поступальних і обертальних форм руху. Проведений енергетичний аналіз деформацій дав змогу визначити умови переходу до стійких коливальних режимів, що має принципове значення для розрахунку робочих параметрів грохоту.

У **третьому розділі** досліджено процеси самоочищення вільно укладеної сіячої поверхні та стабілізації гранулометричного складу шихти. Запропоновано аналітичні залежності, що описують умову евакуації заклинених частинок в отворі сита під дією вібраційно-ударних навантажень, а також модель руху частинок по сіячій поверхні. Встановлено закономірності впливу кінематичних параметрів коливань на швидкість переміщення та висоту підкидання частинок, що дозволило кількісно описати умови ефективного самоочищення. Наведені результати дослідження дроблення частинок агломерату підчас їх ударної взаємодії з ситом, а також встановлено енергетичні умови їх руйнування, що надає необхідне уявлення в питаннях стабілізації гранулометричного складу залізовмісної частини шихти, який впливає на газодинамічні процеси доменної плавки.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням динамічного стану сита та технологічних показників процесу грохочення. На лабораторній установці відтворено роботу грохоту з вільно укладеною сіячою поверхнею, що дозволило детально вивчити вплив частоти й амплітуди коливань на ефективність розсіву, інтенсивність внутрішньошарових процесів, транспортну продуктивність та ступінь самоочищення сит. Результати експериментів підтвердили адекватність теоретичних моделей, а також дали змогу побудувати регресійні залежності, які відображають екстремальний характер впливу динамічних параметрів на технологічні показники. Встановлено оптимальні режими роботи грохоту, що забезпечують максимальну ефективність процесу грохочення та мінімальну забиваність сит.

У **п'ятому розділі** розглянуто питання зносостійкості полімерних сит і вибору амортизуючих елементів. Автором розроблено математичну модель зносу, яка враховує абразивні та втомні механізми руйнування, а також визначено залежності для оцінки ресурсу роботи полімерних сіячих поверхонь. Паралельно досліджено напружений стан пружних елементів грохоту, що працюють у вібраційно-ударному режимі. Запропоновані нові аналітичні залежності для оцінювання жорсткості та напружень у пружинах різних перерізів, які дозволяють підвищити точність розрахунків. Розроблено конструкцію гумово-

пружинного амортизатора, здатного ефективно гасити просторові коливання та підвищувати надійність машини.

Шостий розділ присвячено промисловим дослідженням розроблених технічних рішень на базі провідних підприємств гірничо-металургійної галузі. Експериментально підтверджено підвищення ефективності грохочення, зменшення забиваності сит, покращення стабільності гранулометричного складу агломерату, а також економічну доцільність впровадження грохотів з вібраційно-ударним режимом, який реалізуються за рахунок вільно укладеного сита. Отримані результати засвідчили високу відповідність аналітичних моделей експериментальним даним і продемонстрували значний промисловий ефект у вигляді зниження питомих витрат та підвищення продуктивності виробництва.

У **висновках** узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень, сформульовано основні наукові та практичні здобутки, що визначають внесок автора у розвиток теорії та практики вібраційно-ударних машин.

Додатки включають матеріали, які забезпечують комплексне уявлення про проведені дослідження.

Структура та зміст дисертаційної роботи та реферату співпадають.

4. Оцінка обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

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 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.

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…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 заклинились, з отворів сіячої поверхні вільно укладеній 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.

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 начальному 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/с^2 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.

Вирішення поставлених у дисертаційній роботі наукових завдань автор здійснював із використанням сучасного комплексного підходу до досліджень, що забезпечило належний рівень наукової обґрунтованості та достовірності результатів. Для аналізу впливу якості підготовки шихтових матеріалів на металургійні процеси спікання та плавки, а також визначення наукової проблематики застосовано методи експертного оцінювання та Дельфі. Теоретичні дослідження стану сіячої поверхні в умовах вібраційно-ударної дії виконано на основі фундаментальних положень динаміки твердого тіла та теорії коливань динамічних систем. Вивчення процесів самоочищення вільно укладеної сіячої поверхні та стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти, що розсіюється на ній, проведено з використанням методів геометричного аналізу, механіки контактної взаємодії, теорії пружності, механіки руйнування та динаміки деформованих тіл. При розробці математичної моделі прогнозування зносу та оцінки строку експлуатації сіячої поверхні залучено основні положення теорії тертя та зношування. Експериментальна частина роботи виконувалася із застосуванням методів планування експерименту, стандартних засобів віброметрії та хронометражу. Для обробки й аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень використано методи математичної статистики. Достовірність отриманих результатів підтверджена комплексом лабораторних і промислових досліджень, що засвідчує їх практичну значимість та адекватність теоретичних положень.

Обґрунтованість та достовірність результатів дослідження підтверджується їх успішною апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, що засвідчує відповідність виконаних робіт сучасним вимогам наукової спільноти. Отже, наукові положення, висновки, отримані результати та запропоновані практичні рекомендації вирізняються належним рівнем обґрунтованості, адекватністю та надійністю.

5. Практичне значення результатів роботи

Використання отриманих результатів дало змогу розробити методику розрахунку конструктивних, кінематичних і динамічних параметрів вібраційних машин із вільно укладеною сіячою поверхнею, розміщеною у просторі, утвореному швелероподібним підситником, а також створити методику визначення параметрів вібраційно-ударного режиму, необхідних для стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти перед її завантаженням до доменної печі. У межах дослідження визначено горизонтальну жорсткість пружинних елементів із витками круглого та прямокутного перерізів для вібраційних машин, що працюють у вібраційно-ударному режимі, та розроблено методику вибору гвинтових циліндричних пружин стискання з урахуванням зсуву їх опорних витків. Окремо запропоновано конструкцію і методику розрахунку гумово-пружного амортизатора стискання-зсуву з рівними жорсткостями, який забезпечує підвищену надійність і працездатність вібраційних машин в умовах дії вібраційно-ударних навантажень. Крім того, сформульовано низку нових технічних рішень, спрямованих на інтенсифікацію процесів підготовки металургійних шихтових матеріалів фракціонуванням перед операціями спікання та плавки.

6. Оцінка мови, стилю й оформлення дисертації

Дисертаційна робота викладена сучасною технічною мовою з використанням загальновизнаної наукової термінології, що забезпечує чіткість формулювань і коректність подання матеріалу. Стиль викладу відзначається логічною послідовністю, доступністю сприйняття та відповідністю академічним стандартам. Оформлення матеріалів дисертації здійснено у суворій відповідності до чинних нормативних вимог, зокрема до наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 із змінами, згідно наказу Міністерства освіти і науки України № 759 від 31.05.2019, що підтверджує належний рівень структурної та редакційної культури роботи.

7. Оцінка змісту дисертації та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Пополова Дмитра Володимировича написана автором самостійно та за своїм змістом повністю відповідає паспорту

спеціальності 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва.

Дисертаційна робота виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності та не містить ознак фальсифікацій, компіляцій, фабрикації чи плагіату. Усі використані ідеї, результати досліджень і текстові фрагменти інших авторів належним чином задокументовані та супроводжуються посиланнями на відповідні джерела.

8. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи викладено в 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. Результати роботи пройшли апробацію на 10 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: XIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2017); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Механіка машин — основна складова прикладної механіки», яка була присвячена 110-річчю з дня народження чл.-кор. АН України, проф., д.т.н. Кожевнікова С. М. (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2017); XIV Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2018); Міжнародна науково-технічна конференція «Надійність і динаміка важких машин», яка була присвячена 80-річчю академіка НАН України Большакова В. І. (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2018); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Потураївські читання», яка була присвячена 99-й річниці з дня народження академіка НАН України Потураєва В. П. (Дніпровська політехніка, Дніпро, України, 2021); V Міжнародний науковий конгрес «Society of ambient intelligence 2022» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2022); VI Міжнародний науковий конгрес «Society of ambient intelligence 2023» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2023); VII Міжнародний науковий конгресі «Society of ambient intelligence 2024» (ДУЕТ, Кривий Ріг, Україна, 2024); XVIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Технічний університет, Варна, Болгарія, 2024); VII Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Аалто, Гельсінкі, Фінляндія, 2024).

Вказані публікації комплексно висвітлюють ключовий зміст дисертаційної роботи, а також відображають обсяг і специфіку проведених теоретичних

та експериментальних досліджень. Реферат за своїм змістом узгоджується з основними положеннями дисертації та достатньо повно репрезентує її головні наукові результати.

10. Загальні зауваження по роботі

1. Певним дискусійним моментом є зосередження уваги лише на спрямованих коливаннях коробу під час теоретичних досліджень стану сіячої поверхні в умовах відбраційно-ударної дії. Відсутність аналізу інших можливих варіантів коливань може дещо звузити межі застосування результатів, тому варто розглянути або обґрунтувати такий підхід.

2. Викликає певні питання ступінь обґрунтованості використання закону Гука щодо матеріалу частинки, яка розсівається.

3. На мій погляд, під час опису лабораторної моделі машини вібраційно-ударної дії з вільно укладеною сіячою поверхнею доцільно було б навести її технічну характеристику, що сприяло б більш повному розкриттю її функціональних можливостей.

4. Доцільно було б уточнити, які чинники зумовили вибір певних номерів витків пружин для чисельної оцінки можливості застосування виразу (5.36).

5. Було б доцільно пов'язати отримані під час промислових досліджень результати зі змінами газодинамічного стану доменної печі, що дозволило б глибше розкрити практичну значимість проведених досліджень.

6. Необхідно було більш детально проаналізувати механізм руйнування сит під час промислових досліджень.

7. Було б доцільно провести дослідження деформаційне-напруженого стану короба грохота та його елементів при роботі сіячою поверхнею вібраційно-ударної дії.

11. Загальні висновки

Дисертаційна робота Пополова Дмитра Володимировича «Розробка наукових основ створення вібраційно-ударних машин для металургійного виробництва» є самостійною завершеною роботою на актуальну тему, що має теоретичне і прикладне значення.

Отримані здобувачем результати у сукупності вирішують значну науково-технічну проблему, котра полягає в розробці наукових основ створення вібраційно-ударних машин для металургійного виробництва шляхом встановлення закономірностей динамічного стану системи з невтримним зв'язком між

параметрів грохоту, геометричних характеристик сита та механічних властивостей матеріалу, з якого воно виготовлене, процесів його очищення, зносу та руху частинок матеріалу по ньому, визначення впливу вищеперерахованих факторів на підвищення ефективності фракціонування при підготовці металургійних шихтових матеріалів до спікання і плавки. Робота повністю узгоджується з паспортом спеціальності 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва. Реферат відповідає структурі та змісту дисертації.

Відмічені вище опонентом певні недоліки роботи не мають вирішального значення щодо формулювання принципових положень дисертації, її наукової новизни та практичної значимості, та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи у цілому.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам пунктів 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 1197 від 17.11.2021 із змінами, а її автор, Пополов Дмитро Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – Машини для металургійного виробництва.

Офіційний опонент:
провідний науковий співробітник
відділу технологічного обладнання та
систем управління Інституту чорної
металургії ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, старший
дослідник Костянтин БАЮЛ

Підпис Баюла К.В. засвідчую,
вчений секретар
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник Лариса ГАРМАШ