

ВІДГУК

на дисертаційну роботу Міщука Євгена Олександровича «Наукові основи синергетичного процесу подрібнення матеріалів робочими органами машин статичними та динамічними навантаженнями»,

яка представлена до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 26.056.08 на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.05.02 – машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій

На рецензію подано дисертацію, реферат і опубліковані наукові праці.

Розглядувана дисертаційна робота містить: анотацію, вступ, шість розділів загальні висновки, список використаних джерел із 150 найменувань – всього 412 сторінки, включаючи рисунки та таблиці, а також додатки на 39 сторінках.

ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА РОБОТИ

Актуальність

Дисертаційна робота Міщука Є.О. присвячена розв'язанню актуальної проблеми підвищення енергоефективності дробильних машин при виготовленні та переробці будівельних матеріалів.

Масштаби будівництва значною мірою визначають темпи розвитку суміжних галузей, зокрема видобутку і переробки мінеральної сировини. Особливого значення будівельна галузь набуває в умовах масштабного відновлення інфраструктури, модернізації існуючих об'єктів та необхідності раціонального використання матеріальних і енергетичних ресурсів. Одним із визначальних напрямів сучасного розвитку будівельної галузі є підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів. Традиційна модель, за якої для отримання необхідної кількості будівельного матеріалу переважно використовуються природні родовища, поступово доповнюється технологією переробки будівельних матеріалів. Практична реалізація такого підходу безпосередньо пов'язана із застосуванням дробильно-сортувальних машин. Основною вимогою є те, щоб значна частина енергії, що споживається дробильною машиною, повинна бути спрямована безпосередньо на

руйнування матеріалу. Важливе значення має гранулометричний склад та форма зерен. Зазначені вимоги до кінцевої продукції безпосередньо трансформовані автором у вимоги до дробильних машин. Водночас у реальному обладнанні виникають механічні втрати, пов'язані з тертям у підшипникових вузлах, приводах та інших елементах конструкції, деформацією деталей, коливаннями, нагріванням і неповним використанням енергії робочого процесу. Тому перспективним напрямом удосконалення дробильних машин є зменшення непродуктивних енергетичних витрат і підвищення частки енергії, яка безпосередньо використовується для руйнування частинок.

Таким чином, розвиток будівельної галузі, зростання обсягів будівництва та необхідність ефективного використання природних і вторинних ресурсів зумовлюють підвищення ролі дробильно-сортувального обладнання. Роль сучасної дробильної машини повинна розглядатися не лише як механізм для зменшення крупності матеріалу, а як складова технологічної системи, яка визначає якість кінцевої продукції, продуктивність виробництва та рівень енергетичних витрат. А тому створення таких машин є актуальною задачею. Тема дисертації пов'язана із пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у виявленні та дослідженні механізму руйнування під дією статичних і динамічних сил, що передаються робочими органами дробильних машин, та визначено їхній вплив на перебіг процесу подрібнення матеріалів. Враховано особливості виникнення і реалізації сил тертя на окремих етапах технологічного циклу, зокрема під час стискання й переміщення матеріалу, проаналізовано характер формування та розвитку тріщин у структурі матеріалу залежно від виду прикладеного навантаження. Встановлено відмінності процесів руйнування під дією статичних і динамічних сил. Встановлено основні характеристики робочого процесу подрібнення, які визначають розподіл енергетичних витрат у синергетичній

системі руйнування матеріалу за статичного та динамічного характеру навантаження. Досліджено вплив силового поля та конструктивних особливостей дробильних машин на перебіг цього процесу.

На основі отриманих результатів сформовано аналітичний апарат для обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи дробарок, зокрема таких, що можуть цілеспрямовано змінюватися в часі відповідно до поточного стану процесу подрібнення. Вдосконалені методи оцінки напруженого стану в оброблюваному матеріалі у камері подрібнення та методи аналізу енергетичних показників робочих процесів.

Практична значення роботи полягає в розробленні підходів до підвищення ефективності процесів подрібнення матеріалів шляхом урахування комплексної взаємодії та взаємного впливу робочих органів дробильного обладнання на оброблюване середовище. Запропоновані методи розрахунку дають змогу адекватніше описувати та оцінювати перебіг реальних процесів руйнування і подрібнення різних за фізико-механічними властивостями матеріалів, що розширює можливості їх практичного застосування у дробильному обладнанні.

Використання запропонованих методик побудована на комплексному визначенні енергетичних витрат під час реального перебігу процесу подрібнення. Такий підхід дає змогу встановлювати раціональні режими роботи дробильного обладнання з урахуванням фракційного складу вихідного матеріалу та його міцнісних характеристик, що сприяє зниженню питомих енергетичних витрат на отримання заданої фракції.

Достовірність результатів

Достовірність отриманих результатів та обґрунтованість сформульованих висновків і практичних рекомендацій забезпечуються належним теоретичним опрацюванням поставлених задач, коректністю застосованих методів їх розв'язання та узгодженістю прийнятих припущень із фізичною сутністю досліджуваних процесів. Достовірність експериментальних результатів підтверджується достатньою кількістю

проведених дослідів і вимірювань, повторюваністю встановлених закономірностей за різних режимів роботи, а також використанням апробованих стандартних методик проведення експериментів і відповідних вимог до їх реалізації. Порівняння результатів теоретичного моделювання з експериментальними даними засвідчило їх задовільну збіжність, що підтверджує адекватність запропонованих положень і достовірність отриманих результатів.

Повнота викладення результатів дисертаційного дослідження в опублікованих працях та апробація роботи

Реферат відображає основні положення дисертації, де викладено теоретичні та експериментальні дослідження робочих процесів дробильних машин для виготовлення та переробки будівельних матеріалів.

Основні наукові та експериментальні результати досліджень викладено у 36 наукових публікаціях, з них 2 монографії, 21 стаття у фахових наукових виданнях, а саме 15 статей у наукових фахових виданнях, що включені до категорії «Б» та 6 наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 12 тезах доповідей, 1 патенті на корисну модель.

Оцінювання результатів дослідження, що викладено в окремих розділах дисертації

У **вступі**, який викладено на шести сторінках розглянуто традиційні рубрики, що відображають коротку характеристику дисертаційної роботи.

У **першому розділі** дисертації, розкрито сутність процесів та обладнання для подрібнення та переробки будівельних матеріалів. Проаналізовано технологічні схеми дробильних машин. Розглянуто переваги та недоліки традиційних конструкцій дробарок. Виконана оцінка технічних вимог до дробильних машин та особливостей їх робочого процесу. Проаналізовано існуючі методи розрахунку технологічних і конструктивних параметрів дробильних машин. На основі проведеного аналізу поставлено

мету та сформульовано задачі дослідження.

Зауваження до розділу:

1. Бажано було надати посилання на джерело, із якого взята залежність (1.2), сторінка 59.

2. Які конструктивні та технологічні параметри доцільно змінювати в залежності (1.4) для підвищення продуктивності дробарки без погіршення якості продукту дроблення, сторінка 59.

3. Доцільно було б дослідити вплив на продуктивність конусних дробарок частоти обертів на основі залежностей (1.35) та (1.36), сторінка 74.

У другому розділі, наведені теоретичні дослідження процесу подрібнення матеріалу на основі дискретно-континуального моделювання. Систематизовано та проаналізовано закономірності руйнування матеріалів під дією зовнішнього навантаження. Розглянуто основні підходи до опису фізико-механічної поведінки матеріалів, зокрема реологічні моделі, що дають змогу враховувати їх деформаційні властивості, міцність та характер накопичення пошкоджень у процесі навантаження. Окрему увагу приділено фрактальному представленню зони руйнування, в якому геометричні особливості поверхонь тріщин розглядаються як один із чинників, що визначає характер подальшого розвитку процесу руйнування матеріалу. На основі проведених теоретичних досліджень встановлено особливості руйнування матеріалу за статичного та динамічного прикладання навантаження, визначено відмінності у характері розвитку деформацій, тріщиноутворення та втрати цілісності матеріалу залежно від швидкості й режиму силового впливу. Результати аналізу використано для обґрунтування принципів формування контактної поверхні робочих органів дробильних машин. Встановлено, що геометрія робочих поверхонь безпосередньо впливає на характер передачі навантаження на матеріалу. На цій основі систематизовано основні типи контактної взаємодії робочих органів із матеріалом та визначено умови їх реалізації. Такий підхід дає змогу пов'язати конструктивні параметри дробильного обладнання з механізмом руйнування матеріалу й створює передумови для подальшого обґрунтування раціональних геометричних та режимних параметрів

дробильних машин.

Зауваження до розділу:

1. Доцільно для позначення інваріанта тензора напружень використовувати однакову літеру. В пункті 2.2.2 для реологічної моделі ґрунту та піни використовується в якості позначення літера I, сторінка 137, формула (2.63), а для реологічної моделі, сторінка 141, формула (2.67).

2. Для чого до базової моделі геологічної шапки імплементовано теорію нелінійного кінематичного зміцнення?

3. Які переваги та обмеження має геологічна модель порівняно з моделлю Джонсона—Холмквіста (JH2) під час моделювання ударного руйнування бетону.

У третьому розділі, викладено результати моделювання синергетичного подрібнення. Проведено дослідження фізичних закономірностей, що визначають перебіг процесів у робочій камері дробильного обладнання. На основі аналізу існуючих підходів до вивчення процесів руйнування обґрунтовано сукупність фізичних чинників, які визначають характер деформування, переміщення та руйнування матеріалу під дією навантаження. Розглянуто математичні моделі дробильних машин різних конструктивних типів із урахуванням фізико-механічних характеристик матеріалу, зокрема його міцності, деформативності та структурних особливостей. З використанням методу дискретних елементів виконано чисельне моделювання процесу руйнування матеріалу в конусній дробарці, що дало змогу дослідити характер взаємодії окремих частинок між собою та з поверхнями робочих органів, а також оцінити особливості їх переміщення в робочій камері. Встановлено закономірності руху матеріального потоку та його вплив на ефективність реалізації процесу подрібнення. Окремо проаналізовано енергетичні витрати під час роботи вібраційних дробильних машин і визначено основні складові енергетичного балансу процесу руйнування матеріалу. За результатами проведених досліджень сформовано синергетичну модель енергетичних витрат, яка враховує взаємопов'язаний вплив силової взаємодії, переміщення матеріалу, його фізико-механічних

властивостей та конструктивно-режимних параметрів дробильної машини. Запропонована модель створює основу для комплексної оцінки енергоефективності процесу подрібнення та визначення раціональних умов функціонування дробильного обладнання.

Зауваження до розділу:

1. Доцільно розписати загальний тензор напружень в рівнянні (3.37), сторінка 215.

2. Рисунок 3.3 є малоінформативним, сторінка 217.

3. В пункті 3.3.1 додатково можна було б розглянути математичну модель шокової дробарки із складним рухом щоки та порівняти її із моделлю дробарки із простим рухом щоки, сторінка 217.

У четвертому розділі розглянуто теоретичні дослідження із використанням нейронних мереж для оптимізації параметрів механічного режиму при проектуванні дробильних машин. Досліджено можливості застосування нейронних мереж для встановлення закономірностей і прогнозування параметрів процесів подрібнення матеріалів у дробильному обладнанні. Проаналізовано структуру та функціональні можливості нейромережевих моделей щодо апроксимації складних нелінійних залежностей між фізико-механічними властивостями матеріалу, параметрами робочого процесу та режимними характеристиками дробильних машин. Розроблено кластерний підхід до систематизації параметрів механічного режиму роботи обладнання, що дає змогу виділити характерні групи режимів і встановити їх взаємозв'язок із результатами процесу подрібнення. Для вирішення задачі багатофакторної оптимізації сформовано модель на основі адаптивної нейронно-нечіткої системи ANFIS, за допомогою якої досліджено вплив сукупності конструктивних, режимних та фізико-механічних параметрів на ефективність роботи дробильного обладнання. Застосування такого підходу дозволило врахувати нелінійний характер взаємодії між окремими параметрами та сформувавши основу для вибору раціональних характеристик дробильних машин на етапі їх проектування. Окремий напрям досліджень присвячено кінетиці руйнування та формуванню фракційного

складу продукту дроблення. Для опису випадкового характеру процесу використано стохастичний підхід, на основі якого сформовано математичний опис еволюції ймовірнісного розподілу частинок за фракціями. Визначено відповідні рівняння для функції щільності ймовірності з урахуванням її часової зміни, а також отримано окремий опис для стаціонарного режиму, коли характеристики розподілу не залежать від часу. Запропонований підхід дає можливість пов'язати кінетичні закономірності руйнування матеріалу з формуванням кінцевого гранулометричного складу та використовувати отримані залежності для оцінювання й прогнозування результатів роботи дробильного обладнання.

Зауваження до розділу:

1. Доцільно було б навести чому для вирішення задачі моделювання процесу дроблення матеріалів було обрано саме мережу ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), а не MLP (Multilayer Perceptron) або RBFN (Radial Basis Function Network), сторінка 270.

2. Бажано було б навести, як визначалась оптимальна кількість нечітких правил для моделі ANFIS, сторінка 280.

3. Чому для формування структури моделі ANFIS було використано саме нечітку кластеризацію C-mean (FCM), і яку перевагу вона дає порівняно з grid partition?

У п'ятому розділі наведено експериментальні дослідження робочого процесу дробильної машини. На першому етапі проаналізовано існуючі експериментальні підходи до дослідження процесів руйнування та визначено методи, найбільш придатні для оцінювання основних параметрів досліджуваного процесу. З урахуванням поставлених задач сформовано загальну схему проведення експерименту, визначено послідовність виконання досліджень та розроблено відповідну методику отримання експериментальних даних. Для реалізації експериментальної частини обґрунтовано вибір вимірювального та допоміжного обладнання, визначено характеристики дослідних зразків і сформовано вимоги до матеріалу, що використовувався під час випробувань. Проведено серію експериментів із варіюванням параметрів

силового навантаження, у результаті яких встановлено кількісні характеристики процесу руйнування матеріалу. Отримані результати систематизовано й піддано статистичній та математичній обробці, що дало змогу оцінити повторюваність вимірювань, виявити характерні закономірності та встановити взаємозв'язки між параметрами навантаження і результатами руйнування. На основі узагальнення експериментальних даних сформовано вихідну інформаційну базу для перевірки теоретичних положень і оцінювання адекватності розроблених математичних моделей процесу подрібнення.

Зауваження до розділу.

1. Для енкодера OMRON E6B2-CWZ6C бажано було б розписати що означають виходи A, B та Z.

2. Бажано було б зазначити чому для опису руйнування гірської породи було обрано саме модель Тавареса, сторінка 331.

3. Доцільно було б навести, які експериментальні дані з маятникового копра КМ-30 використовувалися для калібрування моделі Тавареса, сторінка 331.

У шостому розділі сформовано практичні рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень під час проектування, налаштування та експлуатації дробильного обладнання. На основі аналізу умов функціонування дробильних машин визначено основні технічні та технологічні чинники, дотримання яких є необхідним для забезпечення стабільності робочого процесу, заданої продуктивності та раціонального використання енергії. Обґрунтовано підходи до вибору конструктивних і режимних параметрів залежно від властивостей вихідного матеріалу та необхідного фракційного складу готового продукту. Розроблено рекомендації щодо встановлення раціональних параметрів процесу подрібнення з урахуванням характеру силового впливу, фізико-механічних властивостей матеріалу та умов його переміщення в робочій камері. Для практичного підтвердження запропонованого підходу наведено приклад визначення параметрів механічного режиму дробильного обладнання, результати якого можуть бути використані як основа для вибору оптимальних умов його роботи

та подальшого підвищення енергоефективності процесу подрібнення.

Зауваження до розділу.

1. В роботі розглядається крім класичних дробильних машин, вібраційні дробарки. Бажано в розділі було б розглянути параметри надійності таких дробарок.

2. Необхідно було описати вплив зношування робочих органів дробильних машин на технологічний процес і яким чином запропонована методика визначення оптимальних параметрів механічного режиму в роботі враховує зміну геометрії робочих органів.

3. Незрозуміло, яким чином на ефективність дроблення впливає перевантаження робочої камери дробарки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Дисертаційна робота Міщука Є.О. «Наукові основи синергетичного процесу подрібнення матеріалів робочими органами машин статичними та динамічними навантаженнями» є завершеною науково-дослідною працею і відповідає науковій спеціальності 05.05.02 – Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій.

2. В дисертації отримані й наведені нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які у сукупності є суттєвими для створення та удосконалення дробильних машин нового покоління, а достовірність та ефективність запропонованого методу розрахунку режимів машин для подрібнення матеріалів на основі синергії їхнього робочого процесу доведена дослідним шляхом.

3. Реферат за формою і змістом являє собою послідовний скорочений виклад тексту дисертації, а публікації розкривають основні наукові та практичні результати виконаної дисертаційної роботи.

4. Вказані у відгуку зауваження не знижують оцінки роботи.

5. Таким чином, дисертація Міщука Є.О. «**Наукові основи синергетичного процесу подрібнення матеріалів робочими органами машин статичними та динамічними навантаженнями**» за актуальністю,

новизною, теоретичною та практичною цінністю, змістом, оформленням та структурою повністю відповідає «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» Постанови Кабінету міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 року (зі змінами внесеними згідно з постановами Кабінету міністрів України № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024, № 928 від 30.07.2025) щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор **Міщук Євген Олександрович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за науковою спеціальністю 05.05.02 – «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій».

Офіційний опонент, проректор
з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»,
доктор технічних наук, професор



Богдан Олегович КОРОБКО