

ВІДГУК

на дисертаційну роботу **Міщука Євгена Олександровича** «Наукові основи синергетичного процесу подрібнення матеріалів робочими органами машин статичними та динамічними навантаженнями», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.02 – машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій

На рецензію подано дисертацію, реферат і опубліковані роботи.

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, додатків і списку літератури. Загальний обсяг дисертації 412 сторінок.

Реферат за формою і змістом є послідовним скороченим викладом тексту дисертації.

Реферат і публікації повністю розкривають основні положення дисертаційної роботи.

Загальна оцінка роботи

Актуальність теми

Основною економічного зростання будь-якої держави є будівельна галузь. Ефективність будівництва визначається безперервним розвитком і вдосконаленням виробничих процесів. Необхідно зазначити, що науково-технічний прогрес в будівництві базується на підвищенні рівня механізації та автоматизації будівельних процесів за рахунок створення та вдосконалення машин і механізмів та роботизованих комплексів. Сучасні будівельні технології побудовані на виконанні будівельних процесів механізованими методами із використанням автоматизованих та роботизованих систем, які переважно є автономними. Враховуючи потреби держави в будівництві нових будинків, доріг та мостів, а також в реконструкції, ремонту і реставрації існуючого житлового фонду розвиток будівельної галузі є актуальним напрямком наукового дослідження.

Найбільш енергозатратним етапом у галузі будівництва є процес виготовлення будівельних конструкцій та переробки ними будівельних матеріалів. З метою розв'язання таких задач використовується дробильно-сортувальне обладнання, від якісних техніко-економічних показників якого залежить ефективність його застосування. Одним із напрямків підвищення ефективності процесів подрібнення матеріалів є всебічне вивчення спільного взаємовпливу робочих органів дробильних машин та матеріалів, а також розробка методів розрахунку, які враховують реальні процеси подрібнення широкого класу матеріалів. Тому підвищення ефективності процесів подрібнення матеріалів для якісного виготовлення будівельних сумішей на основі розробки науково

обґрунтованих методів розрахунку та вдосконалення режимів машин на основі синергії їхнього робочого процесу є актуальною проблемою.

Тема дисертації відповідає напрямку наукових досліджень кафедри машин і обладнання технологічних процесів та кафедри будівельних машин Київського національного університету будівництва і архітектури.

Оцінка обґрунтованості наукових положень висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки і рекомендації, які отримані в результаті проведеного дослідження обґрунтовані коректною побудовою математичних моделей, що описують робочий процес дробильних машин. Запропоновані теоретичні залежності отримали практичне підтвердження.

У результаті аналізу робочих процесів дробильних машин в роботі встановлено, що методологія розрахунку таких машин є не досконалою і містить велику кількість емпіричних методик розрахунку, це в свою чергу призводить до завищених енерговитрат та низькій якості продукту дроблення. На основі проведених досліджень кінематики дробильних машин встановлені оптимальні частотні режими їх роботи, які не відповідають теоретичному оптимуму, що пов'язано із неврахуванням багатьох фізичних процесів та використанням переважно емпіричних підходів при проектуванні дробильних машин.

Проведено експериментальні дослідження руйнування матеріалу за допомогою маятникового копра, виготовлено вимірювально-реєструюче обладнання та створена комп'ютерна програма для зняття показів руху маятника. На основі цього була визначена зміна енергії маятника при руйнуванні дослідних зразків. Як дослідні зразки використовувались підготовлені бруски із граніту, мармуру та габро. За результатами досліджень було встановлено кількість енергії, яка необхідна для руйнування визначеного розміру матеріалу. Так енергія руйнування зразка, площа поперечного перерізу якого варіює від $0,0001 \text{ м}^2$ до $0,0015 \text{ м}^2$, знаходиться в межах $10 \dots 30 \text{ Дж}$.

На основі експериментальних даних та ґрунтуючись на теорії руйнування Тавереса була підготовлена відповідна модель руйнування, яка була використана при моделюванні процесу руйнування матеріалу в конусній дробарці із використанням методу дискретного елемента. Результати моделювання показали завищенні значення енергозатрат, що вказує, з одного боку, на складність відтворення процесу руйнування матеріалу через значний рівень стохастичності процесу, а з іншого боку – відбувається дисипація енергії внаслідок тертя частинок матеріалу між собою та по поверхні робочих органів дробильних машин,

міжзерногого тертя, нагрівання матеріалу, кінематики дробильної машини тощо. На значні нераціональні витрати енергії також вказують дослідження підготовлених моделей щокрової ексцентрикової та вібраційної дробарок.

В роботі описана модель контактної взаємодії різних форм дробильних ланок машин із матеріалом та з врахуванням сили тертя. Ця модель призначена в подальшому для оптимізації енергозатрат процесу руйнування матеріалів.

В зв'язку із значним емпіризмом розрахунку конструкцій дробильних машин та визначенні параметрів механічного режиму, а також у відсутності універсальної методики проектування таких машин були проведені дослідження з використання нейронної мережі типу ANFIS для спрощення процесу створення таких машин на етапі їх проектування. На основі підготовленого набору даних параметрів механічного режиму таких машин та відповідного алгоритму нейронної мережі вдалося отримати параметри машини відповідно до поставлених умов, похибка моделі нейронної мережі склала 11% в порівнянні із реальними значеннями дробильних машин. Алгоритм нейронної мережі можна покращити за рахунок збільшення розміру навчальної моделі, зміни або збільшення кількості вхідних параметрів, використанні інших членських функцій, використанні інших методів визначення максимуму функції. На основі розглянутої нейромережі запропоновано модифіковане рівняння для визначення потужності процесу дроблення. Розглянута задача кластеризації дробильних машин на основі методу k-mean, мета якої спростити ідентифікацію дробильної машини та визначення діапазонів зміни параметрів для відповідних класів машин.

Виконані дослідження стохастичних процесів та на основі диференціального рівняння Фоккера – Планка і енергетичного рівняння встановлено аналітичну залежність для функції щільності вірогідності розподілу матеріалу по фракціям внаслідок руйнування. Окремо досліджена часова еволюція щільності вірогідності на основі власних функцій оператора Ліувілля. Найбільша дисипація енергії припадає на першу функцію розподілу, де власне значення λ оператора L є від'ємним. Ця модель щільності вірогідності розподілу може бути використана при моделюванні процесів руйнування дробильними машинами з використанням методу дискретного елементу разом із двома іншими поширеними методиками розподілу – Годена-Шумана та неповним бета- розподілом.

Ґрунтуючись на отриманих експериментальних даних був визначений коефіцієнт опору для різних матеріалів та встановлені картини залежностей коефіцієнту динамічності від відносної частоти для відповідного матеріалу. Результати цих досліджень дають можливість оцінити кількість енергії, яка розсіюється внаслідок тертя, що виникає між частинками матеріалу при його

перерозподілу в камері дроблення, та між частинками і робочими органами дробарки при просуванні матеріалу до розвантажувального отвору.

Розроблено методику розрахунку основних параметрів дробильних машин та надані рекомендації щодо розробки системи керування робочим процесом дробильної машини в залежності від фізико-механічних параметрів матеріалу та параметрів машини. Наукові результати передано для впровадження у виробництво та впроваджено в освітній процес кафедри машин і обладнання технологічних процесів київського національного університету будівництва і архітектури в дисципліни: „Теорія пружності”, „Статика та динаміка”, «Машини для виробництва будівельних матеріалів», «Синтез машин і обладнання будіндустрії». Алгоритми розрахунку використовуються в курсовому проектуванні у вибіркових дисциплінах для спеціальностей «Прикладна механіка» та «Галузеве машинобудування».

В цілому наукові положення є обґрунтованими та достовірними.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає в тому що вперше:

виявлені та визначені сили тертя між шматками матеріалу в камері подрібнення на стадіях стискування та випадання матеріалу, встановлені закономірності зміни тріщин у матеріалі під час його руйнування статичними і динамічними навантаженнями робочими органами дробильних машин будівельної індустрії, визначені параметри робочого процесу, що є домінуючими у балансі енергії синергетичного процесу подрібнення в умовах статичного та динамічного навантаження в полі діючих сил дробарок різної конструкції, отримані аналітичні залежності для визначення раціональних, зокрема змінних у часі, параметрів і режимів машин для подрібнення матеріалів. Вдосконалені методи оцінки напруженого стану в шматках матеріалу в камері подрібнення та методи аналізу енергетичних показників процесів подрібнення матеріалу. Отримали подальший розвиток методи моделювання систем складної структури в режимах статичних та динамічних навантажень та методи врахування реальних процесів подрібнення широкого класу матеріалів в алгоритмах, а також у методиках розрахунку параметрів робочого процесу дробильних машин.

Практична цінність роботи полягає в запропонованих принципах підвищення ефективності процесів подрібнення матеріалів на основі розгляду спільного взаємовпливу робочих органів дробильних машин та матеріалів. Розроблені методи розрахунку враховують реальні процеси подрібнення широкого класу матеріалів. Процедура використання методик передбачає визначення енергетичного балансу

за умова реального розгляду процесу подрібнення, забезпечуючи мінімізацію енергетичних витрат в залежності від фракційного складу матеріалу, його міцностних характеристик.

Результати досліджень передано до впровадження в ТОВ «ПОБІ ВОТЕР ІНЖИНІРИНГ» (м. Київ), ПП «Контакт» (смт. Нова Борова, Житомирська обл.).

Отримані наукові результати можуть бути широко використані на машинобудівних заводах, що виписують техніку для виробництва будівельних матеріалів.

Достовірність результатів

Основні положення, які виносяться на захист, висновки та практичні рекомендації достовірні та обгрунтовані.

Достовірність результатів обгрунтована достатньо коректним поставленням задачі дослідження, використанням теоретичних передумов і допущень, що базуються на дослідженні процесів руйнування кам'яних матеріалів в складному напружено-деформованому стані, на основних положеннях механіки руйнування твердих тіл, загальноприйнятих положеннях теорій міцності та теорій суцільного середовища.

Для теоретичних розрахунків використано програми „Wolfram Mathematica v.11.3”, мову програмування “Python v.3.10” з відповідним набором бібліотек. Для моделювання картини напружень та деформацій був використаний програмний комплекс «Ansys Workbench 2022 R1» та «Ansys Workbench 2023 R1». При моделюванні кінематики дробильних машин, як інструмент більшого розширеного аналізу, використовувався програмний комплекс «MSC Adams 2020». Додатково для статистичної обробки результатів експериментальних досліджень використано програмний продукт Microsoft Excel. Збір даних виконувався за допомогою блоку зчитування інформації на базі контролера STM32 та підготовленого відповідного програмного коду. Експериментальні дослідження проводились на установках статичної та динамічної дії в широкому діапазоні зміни параметрів та характеристик міцності подрібнювального матеріалу.

Достовірність також підтверджена апробацією основних результатів досліджень на науково-технічних конференціях та публікаціях автора у виданнях, що входять до категорії “Б” та баз Scopus і Web Of Science.

Оцінювання результатів дослідження, що викладено в окремих розділах дисертації

У вступі. Обгрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету,

задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення роботи.

У першому розділі. «Стан проблеми. Постановка задач дослідження». Виконано оцінка та аналіз конструкцій дробильних машин, методів розрахунку параметрів дробильного обладнання та енергії на перебіг процесу дроблення. Сформульовані задачі дослідження.

Зауваження до розділу:

1. Доцільно було б скоротити обсяг розділу.
2. В назві пункту 1.4 на сторінці 57 краще залишити тільки «Аналіз методів розрахунку параметрів дробильного обладнання», так як аналіз енергетичних законів наведено в пункті 1.6, сторінка 101.

3. Яким чином можна врахувати вплив режиму навантаження, а саме статичного, циклічного або ударного, на енергію руйнування матеріалу?

У другому розділі. «Теоретичні дослідження процесу подрібнення матеріалу на основі дискретно-континуального моделювання» виконаний аналіз механізмів руйнування матеріалів, реологічних моделей, які використовуються при моделюванні фізико-механічних властивостей матеріалів, розглянута фрактальна модель ділянки руйнування матеріалу, яка передбачає наявність зрізаної поверхні на берегах тріщин. Проведені теоретичні дослідження руйнування матеріалу за умов статичного та динамічного навантаження. Наведені обґрунтування поверхневої геометрії робочих органів дробильних машин на основі чого визначені різні типи контактної взаємодії робочих органів із матеріалом.

Зауваження до розділу:

1. Як можна використати параметр швидкості вивільнення енергії для оцінювання енергоефективності процесу подрібнення в щоківній дробарці, пункт 2.1.4., сторінка 123?

2. Для кращого розуміння використання енергетичних та силових критеріїв доцільно було б на сторінці 117 представити схему процесу поширення тріщини за умов навантаження матеріалу в камері дроблення дробарки.

3. Для графіка рис. 2.9 та рис. 2.11 доцільно було б розписати значення відповідних скорочень (точка відсікання тиску – PC, VCR, F_c , F_e).

У третьому розділі. «Системне моделювання синергетичного подрібнення» виконаний аналіз методів дослідження фізичних процесів в камері дроблення, обґрунтовано та визначено фізичні аспекти процесу руйнування матеріалу, проведені теоретичні дослідження математичних моделей дробильних машин різних типів із врахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів, змодельований процес дроблення в конусній дробарці методом дискретного елемента. Здійснено дослідження затрат енергії на процес руйнування матеріалів

вібраційними дробильними машинами. Досліджено рух матеріалу в камері дроблення. Побудована синергетична модель енергозатрат процесу подрібнення матеріалів в камерах дробильних машин.

Зауваження до розділу:

1. Бажано було б розписати відмінність методів FEM та XFEM, які зазначені на сторінці 202.
2. Капілярна сила взаємодії використовується при описі рідин, необхідно було дати розширене пояснення, які процеси вона може описувати в крихких тілах, формула (3.10) на сторінці 205.
3. Доцільно було б навести рішення рівнянь руху пружно-пластичного середовища, формула (3.27), сторінка 210.

У четвертому розділі. «Застосування нейронних мереж для оптимізації параметрів механічного режиму при проектуванні дробильних машин». Виконаний аналіз нейронних мереж, з метою їх використання для визначення параметрів процесів подрібнення матеріалів дробильними машинами. Виконана побудова та дослідження кластерної моделі для класифікації параметрів механічного режиму дробильного обладнання та адаптивної мережі нейронно-нечіткого висновку (ANFIS) з метою оптимізації проектування дробильного обладнання. Проведено дослідження кінетики процесу дроблення з використанням стохастичних методів на основі якого визначені відповідні рівняння для щільності вірогідності розподілу фракцій продукту дроблення із врахуванням часової еволюції та окремо за умов сталого часу.

Зауваження до розділу:

1. Доцільно було б назву розділу змінити на «Застосування нейронних мереж та стохастичних методів для оптимізації параметрів механічного режиму при проектуванні дробильних машин», так як крім нейронних мереж в розділі наводиться стохастичний опис кінетики дробильних машин на сторінці 283, пункт 4.8.
2. Слід було відмітити, яку роль відіграють вагові параметри для моделі багат шарових персептронів із зворотнім поширенням (MLP), сторінка 266.
3. Доцільно було б зазначити, чим мережа радіальної базисної функції RBFN принципово відрізняється від нейронної мережі прямого поширення з сигмоїдальними функціями активації на сторінці 267.

У п'ятому розділі. «Експериментальні дослідження робочого процесу дробильної машини з різними силовими навантаженнями на матеріал» виконана оцінка і аналіз експериментальних методів дослідження, розроблена методика експериментальних досліджень та підібрано обладнання для проведення

експерименту, підібраний матеріал для проведення експерименту, експериментально визначені параметри процесу руйнування матеріалу та проведена обробка експериментальних даних.

Зауваження до розділу.

1. Було б доцільно описати переваги та недоліки прийнятого методу проведення експериментальних досліджень над існуючими методами, розглянутими в пункті 5.1.

2. Варто було розписати, які види енергетичних витрат виникають під час роботи маятникового копра на сторінці 312.

3. Необхідно було відмітити відокремлення енергії, витраченої на руйнування зразка, від механічних витрат копра.

У шостому розділі. «Рекомендації по впровадженню результатів дослідження». Виконаний аналіз технічних вимог для забезпечення ефективної роботи дробильного обладнання, наведені рекомендації із вибору параметрів робочого процесу подрібнення матеріалів та представлений приклад розрахунку параметрів механічного режиму дробильного обладнання.

Зауваження до розділу.

1. В пункті 6.1 бажано було б підкрипити аналіз технічних вимог більшою кількістю графічного матеріалу.
2. В розділі доцільно було б додатково розширити опис технічних вимог аналізом впливу фізико-механічних властивостей гірських порід на вибір режимів дроблення.
3. Бажано було б розглянути, яким чином можна зменшити непродуктивні втрати енергії у дробильному обладнанні.

Загальні висновки з дисертації повністю відображають результати проведених досліджень.

Зміст реферату, незважаючи на стисле подання матеріалу, повністю відповідає основним положенням дисертації.

Дисертація і реферат читаються доступно і добре оформлені.

Повнота викладу основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях

Результати досліджень опубліковано автором у 36 наукових працях, у тому числі 2-х монографіях, 21 статті, зокрема в 15-ти статтях у наукових фахових журналах України, що входять до категорії «Б» та 6 наукових журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 12 тезах доповідей, 1 патенті на корисну модель.

Публікації повністю відображають усі положення та висновки дисертаційної роботи.

Загальні висновки

1. Дисертація Міщука Є.О. є закінченою науково-дослідною роботою, в якій отримані нові науково обгрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності є суттєвим для розвитку техніки і технології машин для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій, має наукову і практичну цінність. Результати наукових досліджень рекомендовано до впровадження у виробництво. Виконані дослідження відповідають спеціальності 05.05.02 – машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій.

2. Отримані результати наукових досліджень в сукупності вирішують важливу для будівельної науки науково-прикладну проблему зниження енергоємності і підвищення продуктивності будівельної техніки.

3. Висновки роботи обгрунтовані і достовірні.

4. Реферат та публікації за темою дисертації відображають сутність основних положень дисертації, де розкрита проблема, наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень, викладені рекомендації і загальні висновки.

5. Указані зауваження не знижують наукової і практичної цінності роботи.

6. Дисертаційна робота «Наукові основи синергетичного процесу подрібнення матеріалів робочими органами машин статичними та динамічними навантаженнями» відповідає вимогам МОН України щодо порядку присудження наукових ступенів а її автор, Міщук Євген Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.02 – «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій».

Офіційний опонент,

Заслужений діяч науки і техніки України,

завідувач кафедри галузевого машинобудування,

Вінницького національного технічного

університету,

доктор технічних наук, професор

Л. К. Поліщук

Вчений секретар
к.т.н., доц.



І. В. Витбак