

Голові разової спеціалізованої разової вченої
ради PhD15042 Тернопільського
національного технічного університету
імені Івана Пулюя
доктору технічних наук, професору,
заслуженому діячу науки і техніки України
Рогатинському Роману Михайловичу

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора **Ляшука Олега Леонтійовича**
на дисертаційну роботу

Коваля Сергія Олександровича

«Обґрунтування параметрів шнекових змішувачів з регульованою подачею»
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 13 «Механічна інженерія»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими напрямками, темами

Тема дисертаційної роботи спрямована на підвищення ефективності функціонування транспортно-технологічних шнекових змішувачів, призначених для одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів. До основних вимог, що висувуються до такого обладнання, належать забезпечення високої продуктивності, отримання однорідної суміші заданої якості, зниження питомих енерговитрат і можливість стабільної роботи за зміни фізико-механічних властивостей компонентів.

Одним із перспективних напрямів удосконалення шнекових змішувачів є використання обертового кожуха, який, разом зі шнеком забезпечує додатковий вплив на траєкторії руху частинок сипкого матеріалу. Зміна співвідношення кутових швидкостей обертання шнека та кожуха дозволяє керувати структурою матеріального потоку, інтенсифікувати циркуляцію частинок у поперечному перерізі робочої камери, збільшувати кратність їх взаємного перемішування та підвищувати однорідність суміші без істотного зростання енерговитрат. Поєднання обертового кожуха із системою регульованої подачі матеріалу створює додаткові можливості для стабілізації ступеня заповнення змішувача, оптимізації часу перебування матеріалу в робочій зоні та підвищення ефективності транспортно-технологічного процесу.

У зв'язку з цим актуальним є розв'язання науково-прикладного завдання, пов'язаного з обґрунтуванням конструктивних і технологічних параметрів шнекових змішувачів з регульованою подачею та обертовим кожухом,

встановленням закономірностей впливу геометричних параметрів робочих органів, режимів їх обертання і параметрів подачі матеріалу на продуктивність, якість змішування, енергетичні показники та ефективність функціонування обладнання. Результати таких досліджень створюють наукові передумови для розроблення високоефективних транспортно-технологічних шнекових змішувачів, здатних забезпечити підвищення однорідності сумішей, зменшення питомих енерговитрат і розширення технологічних можливостей їх використання в різних галузях промисловості та сільського господарства.

Роботу виконано відповідно до напрямку наукових досліджень Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя в межах науково-дослідної держбюджетної теми ВК 72-24 «Розроблення енергоефективних конструкцій та ресурсозберігаючих технологій виробництва робочих органів гвинтових транспортно-технологічних машин» (номер державної реєстрації 0124U002485).

2. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі Ковалю С.О. отримано такі основні наукові результати:

- вперше розроблено математичну модель руху частинок суміші по поверхні обертового кожуха гвинтового конвеєра-змішувача з урахуванням їх кутового положення в перехідному режимі транспортування;
- вперше запропоновано модель руху динамічного тіла волочіння суміші як взаємодії двох елементів із протилежними напрямками дії зовнішніх сил відносно обертового кожуха;
- уточнено залежності для визначення кінематичних і силових параметрів похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом у перехідному режимі транспортування-змішування;
- удосконалено поточно-коміркову модель змішування для гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом шляхом розбиття комірок за кількістю циклів перелопачування та визначення функції розподілу ключового компонента вздовж робочої зони змішувача.

3. Практична цінність одержаних результатів

За результатами структурного синтезу, теоретичних та експериментальних досліджень розроблено нові конструкції шнекових змішувачів з регульованою подачею, зокрема з обертовим кожухом та обґрунтовано їх раціональні кінематичні параметри, що дало можливість вирішити завдання, яке полягає в досягненні вищих показників однорідності змішування сумішей горизонтальними і похилими шнековими змішувачами.

Спроектовано та виготовлено дослідну установку для визначення продуктивності та енергосилових параметрів шнекового змішувача з регульованою подачею та з обертовим кожухом і проведено його експериментальне випробування зі встановленням його конструктивних і

технологічних параметрів, а також однорідності змішування різних сипких компонентів. Технічна новизна виконаних розробок захищена 9-ма патентами України на корисні моделі.

Отримані наукові та практичні результати впроваджено у ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль), ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Тернопільська обл., с. Трибухівці), ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Тернопільська обл., смт. Гусятин) та ПП «Хлопівецьке» (Тернопільська обл., м. Копичинці), що підтверджує їх технологічну ефективність і придатність до використання у виробничих умовах.

4. Повнота викладення результатів дослідження у наукових публікаціях, дотримання вимог академічної доброчесності

Основні наукові положення, результати теоретичних і експериментальних досліджень, а також практичні розробки, отримані Ковалем С.О. у процесі виконання дисертаційної роботи, достатньою мірою апробовані та висвітлені у 24 наукових публікаціях, зокрема у 7 статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях України категорії «Б», 9 патентах України на корисні моделі та 8 тезах доповідей міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференцій.

Аналіз змісту опублікованих праць свідчить про те, що вони повною мірою відображають основні положення дисертаційної роботи, її наукову новизну, результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також сформульовані висновки. Обсяг, кількість, рівень та характер наукових публікацій відповідають чинним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, визначеним Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії.

У дисертаційній роботі використання наукових ідей, положень і результатів досліджень інших авторів здійснено відповідно до загальноновизнаних принципів академічної доброчесності із наведенням належних бібліографічних посилань на використані інформаційні джерела. Представлені у дисертації наукові результати є логічно узгодженими, мають завершений характер та належать автору.

Дотримання вимог академічної доброчесності додатково підтверджується апробацією результатів дослідження на міжнародних наукових конференціях, а також їх опублікуванням у фахових рецензованих наукових виданнях, матеріали яких проходять незалежне наукове рецензування та перевірку на наявність неправомірних текстових запозичень.

За результатами аналізу дисертаційної роботи підстав вважати, що автором порушено принципи академічної доброчесності, не встановлено. Ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів наукових досліджень у дисертації не виявлено. Дисертаційна робота відповідає вимогам академічної доброчесності, а результати дослідження є достовірними, належним

чином обґрунтованими та оприлюдненими відповідно до вимог чинної нормативно-правової бази.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірність сформульованих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, є належним чином обґрунтованими, характеризуються внутрішньою логічною узгодженістю та базуються на результатах комплексних теоретичних і експериментальних досліджень. Їх достовірність підтверджується адекватністю прийнятих теоретичних передумов, а також верифікацією отриманих результатів шляхом експериментальної перевірки. Для досягнення поставленої мети автором реалізовано комплекс взаємопов'язаних теоретичних та експериментальних досліджень, а основні результати роботи своєчасно апробовано та оприлюднено у наукових публікаціях.

Теоретичне обґрунтування отриманих результатів виконано із застосуванням положень вищої математики, теоретичної механіки, теорії машин і механізмів, теорії проектування деталей машин, механіки сипких середовищ, а також сучасних методів математичного моделювання, чисельного аналізу та комп'ютерного моделювання робочих процесів транспортно-технологічних машин. Застосований математичний апарат є адекватним поставленим науковим завданням і забезпечує належний рівень теоретичного обґрунтування отриманих результатів.

Експериментальні дослідження виконано із використанням методів математичного планування експерименту, статистичної обробки експериментальних даних, сучасних програмних засобів їх аналізу, стандартизованих методик випробувань та спеціально розробленої експериментальної установки, конструкція якої забезпечила можливість дослідження робочих процесів шнекового транспортера-змішувача з обертовим кожухом за широкого діапазону зміни конструктивних і кінематичних параметрів.

Достовірність наукових результатів підтверджується коректністю використаного математичного апарату, обґрунтованістю прийнятих допущень і вихідних положень, задовільною збіжністю результатів теоретичних досліджень із даними експериментальної перевірки, статистичною обробкою результатів експериментів, а також практичною реалізацією запропонованих конструктивних рішень шнекових транспортерів-змішувачів з обертовим кожухом.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною на належному науково-технічному рівні. Її структура відповідає вимогам, що висувуються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, та включає вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних

джерел і додатки. Побудова дисертації є послідовною, логічною та повною мірою узгоджується з темою, метою та завданнями проведеного дослідження.

У вступі належним чином обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено використані методи дослідження, розкрито наукову новизну й практичне значення одержаних результатів, висвітлено їх апробацію, відображено особистий внесок здобувача та наведено відомості щодо публікацій, у яких оприлюднено основні результати дослідження.

У першому розділі дисертаційної роботи виконано ґрунтовний аналіз сучасного стану наукових досліджень за тематикою дисертації. На основі опрацювання вітчизняних і зарубіжних літературних джерел здійснено системний аналіз конструктивних схем, принципів функціонування та технологічних особливостей шнекових змішувачів і їх робочих органів, а також визначено основні напрями та специфіку їх практичного застосування у транспортно-технологічних процесах оброблення сипких матеріалів.

Здобувачем узагальнено та критично проаналізовано результати відомих наукових досліджень, присвячених удосконаленню гвинтових транспортно-технологічних систем, що забезпечують одночасне транспортування, та перемішування сипких матеріалів. Проведено оцінку існуючих конструктивних рішень, встановлено їх переваги, обмеження та перспективні напрями подальшого вдосконалення.

Окрему увагу приділено сучасним підходам до проєктування шнекових змішувачів, методам структурного та морфологічного синтезу їх робочих органів, а також застосуванню математичного моделювання, комп'ютерного проєктування та інженерного аналізу для обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів транспортно-технологічних машин.

У другому розділі дисертаційної роботи наведено результати теоретичного дослідження робочих процесів горизонтальних і похилих шнекових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. Автором розроблено математичні моделі, які описують кінематику та динаміку переміщення сипкого матеріалу в робочій зоні шнекового змішувача. Зокрема, запропоновано математичну модель руху динамічного тіла волочіння сипкої суміші, локалізованого в межах дуги її піднімання, що здійснює одночасне осьове переміщення вздовж кожуха та обертовий рух відносно поздовжньої осі конвеєра. Крім того, розроблено математичну модель робочого процесу похилого шнекового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом, яка враховує особливості взаємодії матеріального потоку з робочими органами шнекового конвеєра.

На основі розв'язання системи диференціальних рівнянь руху динамічного тіла волочіння, представленого висхідною та низхідною складовими із загальним центром мас, отримано аналітичні залежності для визначення основних кінематичних і силових характеристик процесу транспортування

сипкої суміші. Встановлено закономірності зміни осьової та колової складових швидкості матеріального потоку, визначено залежності для розрахунку продуктивності конвеєра-змішувача, потужності приводу та крутних моментів, що виникають на шнековому робочому органі й обертовому кожусі залежно від конструктивних і технологічних параметрів шнекового змішувача.

Важливим результатом другого розділу є математичне моделювання процесу змішування у похилих шнекових конвеєрах-змішувачах з обертовим кожухом. Для кількісного опису процесу масообміну автором запропоновано поточкову коміркову модель, в якій характерний розмір елементарної комірки відповідає шляху переміщення матеріалу за один цикл перелопачування, що забезпечує адекватне відображення механізму формування однорідної суміші.

На підставі результатів теоретичного аналізу встановлено, що підвищення ефективності процесу змішування забезпечується за рахунок похилого розташування транспортно-змішувальної машини та раціонального поєднання кутових швидкостей обертання шнека і кожуха, які створюють умови реалізації перехідного режиму транспортування сипкого матеріалу. Доведено, що зі збільшенням згладжувальної здатності шнекового конвеєра-змішувача підвищуються інтенсивність масообміну та якість готової суміші, що підтверджує практичну цінність отриманих теоретичних результатів для обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів машини.

У третьому розділі дисертаційної роботи наведено програму, методику та результати підготовчого етапу експериментальних досліджень шнекового змішувача з регульованою подачею матеріалу та обертовим кожухом у напрямку обертання шнека, що забезпечує одночасну реалізацію процесів транспортування і змішування сипких матеріалів. Методика експериментальних досліджень сформована з урахуванням необхідності визначення раціональних конструктивних та технологічних параметрів розробленого шнекового змішувача.

Автором детально описано конструкцію спроектованого та виготовленого експериментального зразка шнекового змішувача, який забезпечує незалежне регулювання частоти обертання шнека, обертового кожуха та кута нахилу шнекового змішувача. Наведено технічні характеристики експериментальної установки, обґрунтовано вибір конструктивних параметрів і діапазонів варіювання технологічних факторів, що забезпечує можливість комплексного дослідження робочих процесів шнекового змішувача.

Для встановлення закономірностей впливу конструктивних і кінематичних параметрів на ефективність функціонування шнекового змішувача застосовано методи математичного планування експерименту із використанням повнофакторного плану досліджень. Запропонована методика дозволила отримати емпіричні моделі, що описують залежності потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха,

продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування від основних факторів дослідження.

Експериментальні дослідження виконано для різних комбінацій сипких матеріалів, зокрема зерен кукурудзи, пшениці, проса, гречки та гороху, що дало змогу оцінити вплив їх фізико-механічних властивостей на енергетичні, кінематичні та якісні показники роботи шнекового змішувача.

У четвертому розділі дисертаційної роботи наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей впливу конструктивних і технологічних параметрів шнекового змішувача з обертовим кожухом на його енергетичні та технологічні характеристики. Отримані експериментальні дані є достатньою основою для перевірки адекватності розроблених математичних моделей і підтвердження результатів теоретичних досліджень.

У роботі представлено результати визначення потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування для різних комбінацій сипких матеріалів, зокрема зерен кукурудзи, пшениці, проса, гречки та гороху.

За результатами статистичної обробки експериментальних даних отримано адекватні емпіричні регресійні моделі, які описують взаємозв'язок між визначальними факторами та вихідними параметрами технологічного процесу. Виконано оцінку адекватності й достовірності побудованих математичних моделей, що підтверджує можливість їх використання для інженерного аналізу, прогнозування експлуатаційних характеристик та оптимізації параметрів шнекового змішувача.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи наведено результати конструктивного синтезу шнекових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів. Запропоновано нові конструктивні рішення шнекових робочих органів із можливістю регулювання міжлопатевого зазору, що забезпечує інтенсифікацію процесу змішування сипких матеріалів різного гранулометричного складу. Практична новизна запропонованих технічних рішень підтверджена патентами України на корисні моделі.

Представлено конструкції шнекових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом, які реалізують різні режими функціонування: з примусовим обертанням кожуха та без нього з можливістю керованого пригальмовування. Запропоновані конструктивні рішення забезпечують регулювання параметрів процесів транспортування і змішування сипких матеріалів, а також захищені патентами України.

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень автором розроблено методика інженерного проєктування шнекових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів. Виконане техніко-економічне обґрунтування підтвердило ефективність і доцільність практичного застосування розроблених конструкцій у технологічних процесах

транспортування та змішування сипких матеріалів.

Загальні висновки дисертаційної роботи є логічно обґрунтованими, відповідають поставленим меті та завданням дослідження, відображають основні наукові результати та підтверджують їх теоретичну і практичну значущість.

Список використаних джерел налічує 173 найменування, охоплює праці вітчизняних і зарубіжних авторів та свідчить про ґрунтовний аналіз сучасних наукових публікацій за тематикою дисертаційного дослідження.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

7. Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, є завершеним науковим дослідженням, має логічну структуру та відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, зокрема вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії. Тематика дисертації, її зміст, наукові результати та сформульовані висновки повною мірою відповідають спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

8. Зауваження до дисертації

1. У першому розділі в п. 1.3 занадто звужено розкрито специфіку проектування шнекових змішувачів та їх робочих органів з використанням сучасних методів моделювання та синтезу. Бажано було б більше приділити увагу конструкторським і технологічним аспектам при проектуванні та виготовленні таких засобів.

2. Коефіцієнти неоднорідності суміші, що представлені на стор. 66 (2.28) та на стор. 93 (2.79) мають різні позначення та дещо змінений вигляд.

3. На рисунках 2.2, стор 59 та 2.5, стор. 70 показані подібні векторні діаграми швидкостей частинки та сил, де рис. 2.2 є частковим випадком рис.2.5 і його можна було не наводити.

4. У четвертому розділі наведено результати дослідження впливу параметрів шнекового конвеєра на потужність приводу обертання шнека, потужність приводу обертання кожуха, продуктивність шнекового змішувача та коефіцієнт неоднорідності змішування різних комбінацій сипких матеріалів. Водночас доцільно було б виконати детальніший аналіз отриманих закономірностей із поясненням фізико-механічних процесів, які обумовлюють характер виявлених залежностей.

5. Недостатньо повно охарактеризовано фізико-механічні властивості сипких матеріалів, що піддавалися одночасному транспортуванню та змішуванню. Бажано було б детальніше проаналізувати вплив їх основних

характеристик на продуктивність технологічного процесу та величину коефіцієнта неоднорідності змішування.

6. Для викладеної у п. 5.2 методики проектування гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів необхідно було б навести приклад чисельного розрахунку.

7. В дисертаційній роботі не вказано, яка нормативно-технічна документація і методики використані для розрахунку економічної ефективності.

9. Висновки

Дисертаційна робота Ковалю Сергія Олександровича «Обґрунтування параметрів шнекових змішувачів з регульованою подачею», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (галузь знань 13 «Механічна інженерія») є актуальною, завершеною науково-дослідною роботою, яка містить наукову новизну, теоретичне і практичне значення, що відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, зокрема наказу МОН України №40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Коваль Сергій Олександрович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Рецензент,
перший проректор
Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя,
доктор технічних наук, професор



Олег ЛЯШУК