

ВІДГУК

офіційного опонента Рогового Андрія Сергійовича
на дисертаційну роботу Баги Вадима Миколайовича
**«Наукові основи гідромеханічних процесів абразивоструменевого
оброблення поверхонь»**,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Актуальність теми.

У період воєнного стану та в рамках подальшої повоєнної відбудови України відновлення пошкоджених об'єктів оборонного призначення та цивільної інфраструктури є надзвичайно важливим. Для проведення цих робіт активно використовується пневмоабразивне обладнання, яке потребує значної енергії. Абразивоструменеве оброблення дає змогу ефективно обробляти конструкції складних форм із різних матеріалів, що широко застосовуються в машинобудуванні. Проте підвищені вимоги до енергозбереження такого обладнання вимагають оптимізації процесів енергетичних перетворень для досягнення максимальної ефективності. Однією з актуальних проблем є зменшення витрат енергії при обробці одиниці поверхні, оскільки це безпосередньо впливає на вартість обробки. Тому, робота направлена на підвищення ефективності пневмоабразивного обладнання завдяки вдосконаленню форми проточної частини робочого сопла та адаптації установок для виконання робіт у важкодоступних місцях є актуальною. Удосконалене обладнання дозволить зменшити час обробки, знизити витрати абразивного матеріалу та повітря, що, у свою чергу, знизить вартість обробки. Важливим є проведення окремих досліджень для кожного типу сопла, враховуючи всі особливості робочого процесу. Важливим фактором для підвищення ефективності пневмоабразивних установок є дослідження витікання повітряно-абразивної суміші через робоче сопло.

Актуальність теми роботи підтверджується так само й тим, що вона пов'язана з виконанням тематик науково-дослідних робіт у межах госпдоговірної науково-дослідної роботи Сумського державного університету «Механічна обробка деталей за технологіями, розробленими в СумДУ» (договір № 51.15-2019.СП/1, 2019 р.); у межах наукового стажування «Improving the efficiency of the working nozzle of the ejector treatment plant» у Технічному університеті м. Кошице (Словаччина) за фінансування Національною програмою Словацької Республіки (02.11.2020 р. – 05.02.2021 р.); у межах держбюджетного фінансування науково-дослідної роботи «Розробка мобільної ежекторно-очисної установки для відновлення будівель, споруд та техніки після пожеж у військовий період» (державна реєстрація № 0124U000636, договір № 51.15.01-24/26.ЗП-01).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Рівень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій,

викладених у дисертаційній роботі Баги В.М., є високим. Він ґрунтується на всебічному аналізі науково-технічної літератури з відповідної тематики, чітко сформульованих меті та завданнях дослідження, використанні сучасних методів аналізу, а також на зіставленні й критичному оцінюванні отриманих результатів у контексті існуючих наукових праць. Висновки сформульовано логічно й аргументовано. Теоретична частина дослідження базується на сучасному математичному апараті та враховує фізичні явища, характерні для процесу абразивоструменевої обробки поверхонь. Достовірність результатів підтверджується їх узгодженістю з відомими раніше залежностями, що засвідчує наукову обґрунтованість зроблених висновків і рекомендацій.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність отриманих у дисертаційному дослідженні результатів забезпечується коректною постановкою математичних задач, верифікацією використаних моделей числових досліджень шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, застосуванням апробованих методів математичного аналізу та математичної фізики, а також відповідністю математичних моделей фізичній природі досліджуваних процесів. Практичну цінність наукових результатів підтверджено їх успішною імплементацією під час розроблення нових ежекторно-очисних установок, що впроваджені на вітчизняних промислових підприємствах.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- вперше створено науково-теоретичні основи гідромеханічних процесів у робочих перфорованих соплах під час абразивоструменевого оброблення поверхні з урахуванням гідродинамічних сил та пористого насадка, що дозволяє вибирати раціональні режими роботи пневмоабразивного обладнання;

- вперше одержано аналітичні залежності для описування робочого процесу повітряно-абразивної суміші в робочому соплі на основі запропонованої математичної моделі передавання енергії робочим потоком дисперсній фазі та оброблюваній поверхні, нестационарного руху повітряно-абразивної суміші й розподілу дисперсних частинок абразивного матеріалу у виділеному об'ємі, що дало змогу оцінити взаємозв'язок між геометричними та режимними параметрами витікання стисненого повітря та абразивного матеріалу через сопло;

- вперше обґрунтовано підвищення ефективності пневмоабразивного обладнання накладанням механічних коливань унаслідок інтенсифікації процесу витікання повітряно-абразивної суміші з робочого сопла ежекторно-очисного обладнання, створення нових, більш ефективних конструкцій проточної частини сопла завдяки зменшенню опору руху робочої суміші;

- вперше встановлено закономірності процесу ерозії поверхонь матеріалу та робочого сопла під час абразивоструменевого оброблення на основі розробленої математичної моделі, параметри якої оцінені за даними експериментальних досліджень, що дало змогу достовірно визначити кількісні характеристики процесу завдяки врахуванню сил Бассе в дробово-

диференціальній формі;

- вперше визначено вплив геометричних параметрів на коефіцієнт витрати сопла для повітряно-абразивної суміші в каналі змінного перерізу з урахуванням газодинамічної взаємодії робочого потоку з оброблюваною поверхнею, що дозволило уточнити швидкість зношування внутрішньої поверхні абразивоструменевого сопла.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Розроблена здобувачем комплексна методика проектування робочих сопел пневмоабразивної установки, яка базується на поєднанні методів аналітичної та обчислювальної гідродинаміки, теорії ідентифікації параметрів дозволяє оцінити кінематичні та функціональні характеристики робочих сопел. Запропоновано нові підходи до розрахунку характеристик сопел і раціонального вибору параметрів очищення, що дозволило розробити енергоефективні конструкції сопел нового покоління. Їх геометрія забезпечує зростання швидкості потоку та реактивної сили на виході, що істотно підвищує ефективність оброблення поверхонь. Розроблено узагальнену методику розрахунку критичних швидкостей і реактивної сили, а також методики визначення ефективності. Удосконалено підхід до обліку нерівномірного розподілу абразиву в потоці та використано ефект ежекції Вентурі. Створено мобільну установку, адаптовану до умов воєнного та повоєнного часу, яка забезпечує зменшення витрат повітря та матеріалу у 2,5 рази. Результати дослідження впроваджено у виробництво на підприємствах ТОВ «Карбаз», ТОВ «Боско» і ТОВ «НВП «Метекол», а також в освітні програми СумДУ та Військової академії м. Одеси.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 37 наукових працях, у тому числі в 21 публікації у наукових фахових виданнях України та закордонних періодичних виданнях, що входять в наукометричну базу Scopus (12 публікацій). У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Баги Вадима Миколайовича складається зі вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних джерел, 2 додатків.

У вступі обґрунтовано напрямок досліджень та актуальність вирішення проблеми підвищення ефективності гідромеханічних процесів абразивоструменевого оброблення поверхонь.

У першому розділі якісно узагальнено наукову базу, що стосується гідродинаміки двофазних потоків, зокрема повітряно-абразивної суміші. Дослідження розширює наявні уявлення про ефективність роботи абразивоструменевих сопел, водночас наочно демонструє прогалини у сучасних підходах. Розглянуто ерозійні процеси, явище стрибків ущільнення й ефект Вентурі. Однак у викладі бракує критичного аналізу різних підходів і

систематизації джерел. Також корисно було б розширити аналіз зарубіжного досвіду й використати порівняльні таблиці або матриці недоліків існуючих конструкцій. Постановка завдань логічна, хоча деякі з них варто було б розділити на теоретичні й прикладні для кращої структури.

Другий розділ демонструє ґрунтовне опрацювання методології, включно з аналітичними, числовими та експериментальними методами. Позитивно, що використовуються сучасні інструменти, як-от ANSYS, PTC MathCAD, методи обчислювальної гідродинаміки та скінченноелементний аналіз. Добре розроблено експериментальну установку й надано її фотоматеріали. Проте недостатньо деталізовано налаштування моделювання (наприклад, умови симуляцій у ANSYS) та не охарактеризовано похибки експериментальних вимірювань. Є потреба у валідації моделей турбулентності та оцінці впливу сіток на результати розрахунку. Розділ виграє від практичної спрямованості, однак методична частина виглядала б сильнішою, якби автор глибше проаналізував межі застосування обраних моделей.

У третьому розділі дисертаційної роботи представлено складний, але належним чином обґрунтований математичний апарат, що ґрунтується на врахуванні реальних фізичних чинників, зокрема інерційності частинок, сил Бассе та гідродинамічного опору. Запропонована модель у дробово-диференціальній формі становить важливий внесок у розвиток теоретичних основ гідромеханіки двофазних потоків у соплах. Разом з тим, надмірна насиченість розділу рівняннями ускладнює сприйняття матеріалу, оскільки пояснення значень використовуваних змінних і параметрів є недостатньо повними. Частина рівнянь подана без супровідних коментарів щодо їх фізичного змісту. Відчувається брак узагальнень, адже низка висновків залишається неявно сформульованою. Формули (13)-(17) реферату мають характер статистичних залежностей, результативність яких можлива лише за умови виконання серії експериментів, що ускладнює їх безпосереднє практичне застосування. У дисертації та авторефераті зазначено, що теоретичні значення витрат корелюють з експериментальними даними, однак відсутнє наочне зіставлення відповідних результатів. Незважаючи на зазначені зауваження, розділ відзначається високим рівнем наукової опрацьованості.

Четвертий розділ дисертаційної роботи засвідчує якісну верифікацію запропонованих теоретичних моделей на основі експериментальних і числових досліджень. Його сильним аспектом є узгодження результатів фізичного експерименту та комп'ютерного моделювання, що підтверджує високу достовірність отриманих даних (розбіжність становить менше 2 %). Варто позитивно відзначити застосування широкого спектра геометричних конфігурацій сопел і різного фракційного складу абразивного матеріалу. Разом з тим, структура викладення дещо ускладнена через надмірну кількість графічного матеріалу, який подано без належного коментаря. Доцільним було б також доповнити виклад оцінюванням повторюваності експериментів і представленням статистичних характеристик варіацій результатів. Відсутня

інформація щодо довірчих ймовірностей та інтервалів. Загалом розділ характеризується високим рівнем експериментальної опрацьованості та логічною послідовністю проведення досліджень.

Розділ п'ять найбільш практикоорієнтований. Наведено чіткі результати оптимізації конструкцій сопел із вказівкою на підвищення ефективності у 2-4 рази. Вивчення впливу довжини, діаметра, кута розпилення тощо є системним і добре аргументованим. Вдало використано апарат регресійного аналізу. Однак з аналізу випливає, що частина залежностей апроксимується лише на обмеженому діапазоні даних – це обмеження варто було б чітко задекларувати. Модель перфорованої вставки потребує подальших підтверджень у промислових умовах через можливе забивання малих отворів. Зазначено, що зменшення довжини циліндричної частини сопла до 4 мм сприяє зростанню швидкості потоку більш ніж удвічі, що супроводжується збільшенням масової витрати суміші та коефіцієнта витрат, унаслідок чого підвищується продуктивність процесу. Водночас виклад потребує узагальнення у вигляді критеріальних залежностей або коефіцієнтів, зокрема із залученням теорії подоби, оскільки твердження про ефективність саме при довжині сопла 4 мм викликає сумніви. Імовірно, ефект залежить від певних безрозмірних параметрів, що доцільно було б уточнити. У роботі доцільно обмежити використання абсолютних числових значень і натомість надати перевагу відносним характеристикам або безрозмірним критеріям. За потреби використання сопла з іншими геометричними параметрами неможливо здійснити відповідні розрахунки, спираючись лише на матеріали дисертації. Це знижує універсальність та прикладну цінність отриманих результатів. Крім того, на поданих рисунках недостатньо чітко простежується зв'язок між варіацією діаметра абразивних частинок та ефективністю функціонування сопел. Водночас, з огляду на заявлену мету аналізу, доцільно конкретизувати, який саме критерій ефективності піддається впливу з боку розміру частинок, та у який спосіб це проявляється у представлених результатах.

В шостому розділі обґрунтовано практичну цінність розробок: як для виробництва, так і для оборонного комплексу. Пропозиції щодо мобільної установки, зменшення витрат повітря і абразиву та спрощення обслуговування мають високу інженерну значущість. Водночас розділ не містить економічного аналізу (вартість/ефективність), що зробило б обґрунтування переконливішим. Варто було б описати тривалість, надійність, обмеження використання нових сопел у реальних умовах. Проте результативність і кількість впроваджень підтверджують завершеність циклу «модель-експеримент-впровадження». На окремих графічних зображеннях (зокрема, рис. 17б, 19б) спостерігається відбиття твердих частинок від меж, які не ідентифіковані як фізичні стінки. Доцільно надати пояснення щодо природи цього явища: чи йдеться про числовий артефакт, зіткнення частинок, особливості граничних умов моделювання, чи фізично зумовлену зміну траєкторії частинок. Важливо уточнити, які саме чинники спричиняють їхній зворотний рух. Рисунки 17-21 містять виключно візуалізації траєкторій

абразивних частинок, однак відсутні порівняльні графіки або узагальнені кількісні характеристики, які б дозволили оцінити ефективність процесу. Доцільно доповнити ці ілюстрації аналізом якісних і кількісних критеріїв, що демонструють особливості чи неочікувані ефекти в динаміці частинок, а також зв'язок із показниками, що характеризують ступінь очищення або інші критерії ефективності оброблення.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації з 402 найменувань.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. У дисертаційній роботі розглянуто кілька типів конструкцій робочих сопел – зокрема, перфоровані, із накладанням механічних коливань, а також сопла типу Вентурі. Робота виграла б, якщо між цими конструктивними варіантами простежувався б чіткий системний взаємозв'язок, та був наведений їх порівняльний аналіз у контексті ефективності робочих процесів.

2. Доцільно чіткіше окреслити методику розрахунку, доповнивши її кількісною оцінкою очікуваного підвищення ефективності, а також вказати ключові параметри або безрозмірні критерії, реалізація яких сприятиме досягненню бажаних результатів.

3. Доцільно надати уточнення щодо методики розрахунку або вимірювання контактних напружень, зокрема в частині, де стверджується про їх зниження на 13 %. Це особливо важливо з огляду на відомий факт, що в Ansys Fluent реалізовано п'ять різних моделей ерозійного зношування поверхні твердими частинками, результати яких можуть істотно відрізнятися – іноді на порядки.

4. Доцільно було б у висновках чітко сформулювати підхід до розрахунку гідромеханічного процесу абразивоструменевого оброблення, вказати кількісні показники підвищення ефективності та визначити ключові параметри або критерії, що забезпечують бажаний результат та розраховуються за допомогою критеріальних чисел (наприклад, Re , Pr , Sh).

5. У дисертації відсутній аналіз економічної доцільності впровадження розроблених технічних рішень, зокрема співвідношення «вартість/ефективність». Доцільно було б також висвітлити експлуатаційні характеристики нових сопел – зокрема їхню тривалість роботи, надійність та обмеження застосування в умовах реального виробництва. Крім того, у роботі не сформульовано чітких критеріїв ефективності, що ускладнює об'єктивну оцінку переваг запропонованих рішень.

6. Потребує більшої уваги та роз'яснення використання умовного коефіцієнта витрати, значення якого більше ніж 1, враховуючи, що автор дає таке його визначення на стор. 164 «це відношення витрати газу в дійсному

процесі розширення до витрати газу в ізоентропному процесі розширення, характеризує зменшення дійсної витрати газу у порівнянні з ізоентропним (ідеальним) процесом»

7. Текст рукопису дисертації, має окремі неточності, орфографічні та синтаксичні помилки.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

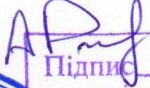
ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Баги Вадима Миколайовича «Наукові основи гідромеханічних процесів абразивоструменевого оброблення поверхонь» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову проблему, суть якої полягає в інтенсифікації й удосконаленні процесів витікання повітряно-абразивної суміші з сопла пневмоабразивного обладнання шляхом розроблення науково-теоретичних основ процесу вібраційного впливу на двофазні системи, аналізу впливу процесів тертя й супутнього процесу ерозії поверхонь матеріалів на ефективність процесу абразивоструменевого оброблення. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а здобувач Бага Вадим Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент:
завідувач кафедри гідравлічних
машин ім. Г.Ф. Проскури
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор

15 травня 2025



Підпис  Андрій РОГОВИЙ
ЗАСВІДЧУЮ:
ПРИСЛУЖБОВИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
"_____ 20__ р.