

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

БАГА ВАДИМ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 66.084:66.021.1(043.5)

**НАУКОВІ ОСНОВИ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
АБРАЗИВОСТРУМЕНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі технічної теплофізики факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Павленко Іван Володимирович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри комп'ютерної механіки
ім. В. Марцинковського, м. Суми.

Опоненти: доктор технічних наук, професор
Луговський Олександр Федорович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» Міністерства
освіти і науки України, науковий керівник
кафедри прикладної гідроаеромеханіки
та механотроніки, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Роговий Андрій Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри гідравлічних машин
ім. Г. Ф. Проскури», м. Харків;

доктор технічних наук, професор
Мачуга Олег Степанович,
Національний лісотехнічний університет
України Міністерства освіти і науки
України, професор кафедри лісових машин,
м. Львів.

Захист відбудеться «19» червня 2025 року о 12:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (ауд. 28).

З дисертацією та рефератом можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 та за посиланням <https://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vr/archives/6187>

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11

Юрій ЮДІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час воєнного стану та в межах подальшої повоєнної відбудови України проблема відновлення пошкоджених поверхонь об'єктів оборонного призначення й цивільної інфраструктури є особливо актуальною. Для виконання відповідних відновлювальних робіт широко використовують пневмоабразивне обладнання, що є достатньо енергоємним. Абразивоструминне оброблення дозволяє якісно обробляти конструкції складних форм більшості матеріалів у машинобудуванні.

Проте підвищення вимог до енергозбереження такого обладнання передбачає необхідність забезпечення повноти процесів перетворення енергії для виконання корисної роботи. Зокрема, під час виконання абразивоструменевого оброблення матеріалу розроблення заходів щодо зменшення споживання енергоресурсів для оброблення одиниці поверхні матеріалу є актуальною проблемою, оскільки їх витрата обумовлює вартість виконання абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів. Основна ідея дисертаційної роботи полягає в забезпеченні максимальної ефективності та інтенсивності роботи пневмоабразивного обладнання завдяки вдосконаленню її головного робочого органа – більш ефективної форми проточної частини робочого сопла, а також адаптації установки до виконання висотних та виїзних робіт. Це приведе до збільшення інтенсивності оброблення внаслідок зниження часу оброблення квадратного метра матеріалу, зниження витрат абразивного матеріалу (дисперсної фази) та повітря (суцільної фази), що також істотно зменшить вартість абразивоструменевого оброблення поверхонь.

У класичній літературі немає усталених критеріїв та показників роботи сопла, оскільки сфери застосування сопел настільки широкі, що одне й те саме сопло може мати відмінні показники ефективності. Прийнято оцінювати роботу сопла відповідним коефіцієнтом витрати, що враховує геометричні особливості. Коефіцієнт витрати сопла може бути доповнений поправковим коефіцієнтом щодо впливу фізичних властивостей робочого середовища та коефіцієнтом, який би враховував реальність процесу чи якісь спрощення, але, як засвідчує низка досліджень, цього недостатньо. Кожне сопло незалежно від своєї геометричної форми та середовища, на якому працює, потребує окремого дослідження з урахуванням усіх особливостей робочого процесу. Важливо розглядати досліджуваний об'єкт не лише від вхідного та вихідного перерізів, а й на відстані, більшій за значення $10d$. Лише за значенням коефіцієнта витрати сопла неможливо оцінити його ефективність.

Окремі результати дисертаційної роботи використовували виконуючи відновлювальні роботи будівель і техніки під час воєнного часу, що актуально для розвитку вітчизняного відновлювального комплексу та підтверджується відповідними актами.

З огляду на вищезазначене необхідність виявлення особливостей процесів витікання повітряно-абразивної суміші через основний орган – робоче сопло пневмоабразивної установки – є актуальною науковою проблемою.

Її вирішення потребує створення достовірних математичних моделей руху повітряно-абразивної суміші, зокрема, у робочому соплі з проникною вставкою.

Також актуальною науковою проблемою є розвиток науково-теоретичних основ дослідження процесу передавання енергії стисненого повітря повітряно-абразивній суміші, що витікає із робочого сопла. Це потребує створення уточнених моделей, які б ураховували динамічні характеристики суцільної фази.

Отже, з огляду на те, що глибоких системних досліджень течії повітряно-абразивної суміші через абразивоструменеві робочі сопла в широкому діапазоні режимних і геометричних параметрів немає, та з урахуванням реальних умов є необхідність розроблення науково-теоретичних основ робочого процесу двофазної повітряно-абразивної суміші в робочому соплі пневмоабразивної установки. Це потребує проведення ґрунтовних наукових досліджень, що сприятимуть удосконаленню наявних і створенню нових високоефективних конструкцій робочих сопел пневмоабразивних установок.

Зважаючи на вищезазначене, тема дисертаційної роботи є актуальною, має важливе наукове та практичне значення, оскільки спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми, пов'язаної зі створенням науково-теоретичних основ робочих процесів у соплі пневмоабразивного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок (Постанова Кабінету Міністрів України № 476 від 30.04.2024 р.), Національному плану дій з енергоефективності на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1803 від 29.12.2021 р. зі змінами, затвердженими Розпорядженням № 899-р від 06.10.2023 р.), Концепції Державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2022–2026 рр.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі технічної теплофізики факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету відповідно до плану держбюджетних науково-дослідних робіт, пов'язаних із такими темами:

– 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).

Мета та завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності сопла за допомогою розроблення науково-теоретичних основ робочого процесу в соплі пневмоабразивного обладнання та інтенсифікації робочих процесів у повітряно-абразивній суміші, спрямованих на формування рівномірного розподілу частинок у повітряному потоці завдяки раціональному вибору геометрії сопла.

Для досягнення поставленої мети визначені такі *завдання*:

- проаналізувати та узагальнити теоретичний опис гідрогазодинамічних процесів витікання повітряно-абразивної суміші через сопло різної форми з урахуванням впливу абразивного матеріалу й властивостей течії для виявлення резервів щодо підвищення ефективності робочого сопла та обґрунтування напряму наукових досліджень;

- теоретично дослідити процес витікання повітряно-абразивної суміші та визначити характеристики течії через перфоровану вставку;

- дослідити турбулентний рух пневмоабразивної суміші в спеціально спрофільованому соплі з тангенціальним підведенням для чищення внутрішнього каналу ствола артилерійських знарядь задля достовірного визначення робочих параметрів сопла;

- створити математичну модель процесу передавання енергії від робочого потоку до частинок абразивної суміші та дослідити ефективність накладання механічних коливань на елементи гідродинамічної системи під час абразивоструменевого оброблення;

- розробити математичну модель процесу ерозії поверхні під час абразивоструменевого оброблення для робочого сопла та оброблюваної поверхні;

- створити теоретичні основи оцінювання параметрів робочого сопла ежекторно-очисної установки на основі узгодження результатів теоретичних досліджень із експериментальними даними;

- підтвердити ефективність розроблених конструкцій робочих сопл та створити методичку їх розрахунку.

Об'єкт дослідження – гідромеханічні процеси в каналі абразивоструменевого робочого сопла та взаємодія пневмоабразивної суміші з оброблюваною поверхнею.

Предмет дослідження – сукупність геометричних і режимних параметрів, що впливають на ефективність оброблення матеріалу під час абразивоструменевого оброблення.

Методи дослідження. На емпіричному рівні наукових досліджень застосовували методи проведення фізичних експериментів (експериментальної газодинаміки, прямого спостереження, оптичного фотографування та числового моделювання; скінченноелементний аналіз, методи обчислювальної гідродинаміки в програмному комплексі ANSYS із подальшим обробленням у системі комп'ютерної алгебри PTC MathCAD). Математичні моделі процесу витікання повітряно-абразивної суміші в системах на теоретичному рівні досліджували на основі методів розв'язування алгебраїчних і диференціальних

рівнянь та їх систем (метод малих збурень у поєднанні з методом комплексних амплітуд). Аналізування одержаних закономірностей здійснювали із застосуванням методів математичного аналізу й статистичного оброблення даних. Оцінювання параметрів математичних моделей за результатами числових та експериментальних досліджень виконували за допомогою псевдообернення Мура – Пенроуза, регресійного аналізу та використання методу найменших квадратів.

Верифікацію одержаних результатів виконували порівнянням із результатами фізичного експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів

Уперше:

1. Створено науково-теоретичні основи гідромеханічних процесів у робочих перфорованих соплах під час абразивоструменевого оброблення поверхні з урахуванням гідродинамічних сил та пористого насадка, що дозволяє більш точно розраховувати робочі параметри повітряно-абразивної суміші, вибирати раціональні режими роботи пневмоабразивного обладнання.

2. 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 отримати більш точні значення витрати через сопло стисненого повітря та абразивного матеріалу.

3. 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.

4. Установлено 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.

5. Запропоновано науковий підхід до визначення впливу 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.

Удосконалено:

1. Науковий підхід до системного дослідження взаємного впливу геометричних і режимних параметрів робочого сопла пневмоабразивного обладнання в індивідуально підібраних для кожного сопла робочих діапазонах значень, завдяки цьому виконано раціональний вибір геометрії проточної

частини робочого сопла, що працює в широкому діапазоні режимних параметрів.

2. Математичну модель робочого процесу в соплі Вентурі з ежектованим повітряним прошарком, яка в поєднанні з уточненими значеннями коефіцієнта витрати сопла дає змогу одержати більш точне значення витрати суцільної та дисперсної фаз.

Набули подальшого розвитку:

1. Теоретичні дослідження робочих процесів гідродинаміки повітряно-абразивної суміші в робочому соплі пневмоабразивного обладнання на основі експериментально одержаних закономірностей.

2. Газодинамічні основи моделювання сопел із використанням внутрішніх оптичних профілів для поліпшення робочих характеристик абразивоструменевих апаратів.

Практичне значення одержаних результатів. Створено методику проектування робочих сопел пневмоабразивної установки на основі комплексного застосування методів аналітичної та обчислювальної гідромеханіки з урахуванням абразивного матеріалу й газодинаміки та теорії ідентифікації параметрів.

Запропоновано методику розрахунку характеристик робочого сопла та раціонального вибору параметрів очищення. На основі розробленої теорії запропоновано нові енергоефективні конструкції робочих сопел, що реалізують переваги сопел нового покоління, принцип роботи яких ґрунтується на взаємодії повітряно-абразивного потоку із запропонованими елементами геометрії робочого сопла. Це дозволило забезпечити збільшення швидкості та відповідно реактивної сили на виході з сопла, сприяючи підвищенню ефективності оброблення матеріалу.

Запропоновано узагальнену методику розрахунку робочого сопла пневмоабразивної установки та оцінювання критичних швидкостей робочого потоку й реактивної сили струменя робочого сопла. Створено методику розрахунку робочого сопла пневмоабразивного обладнання.

Запропоновано методику визначення ефективності робочого сопла пневмоабразивного обладнання на основі побудови аналогії течії через ущільнення й насадки із застосуванням методів обчислювальної гідромеханіки та теорії оцінювання параметрів.

Створено методику фізичного експерименту та розрахунку робочого сопла пневмоабразивного обладнання з урахуванням нерівномірного розподілу концентрації частинок абразивного матеріалу. Запропоновано застосування ефекту ежектованого потоку сопла Вентурі для утворення повітряного прошарку між дисперсною фазою та стінками сопла.

Розроблено мобільну пневмоабразивну установку, яка порівняно з наявними аналогами має особливу цінність для виконання відновлювальних робіт будівель, споруд і техніки під час воєнного часу та подальшого повоєнного періоду завдяки більшій ефективності. Використання нових запропонованих конструкцій робочих сопел дає змогу зменшити у 2,5 рази

витрату стисненого повітря та абразивного матеріалу, а також істотно скоротити кількість обслуговувального персоналу. Моделі й методи раціонального проектування пневмоабразивної установки є корисними в разі впровадження закритих безпилкових абразивоструменевих камер. Також запропоновані алгоритми щодо розрахунку та проектування робочих сопел для абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів і відповідні робочі файли числових розрахунків будуть ефективними для систем, що характеризуються обмеженими енергетичними ресурсами.

Одержані результати дисертаційного дослідження заклали наукові основи розроблення нових та вдосконалення наявних конструкцій абразивоструменевих сопел, переданих для впровадження у виробничу діяльність ТОВ «Карбаз», ТОВ «Боско», ТОВ «НВП «Метекол».

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Сумського державного університету за освітньою програмою «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка» освітнього ступеня «магістр» спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» й за освітньою програмою «Опалення, вентиляція, кондиціонування та штучний холод» освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування», навчальний процес Військової академії (м. Одеса) з підготовки курсантів за спеціалізацією «Експлуатація та ремонт ракетно-артилерійського озброєння», в проведенні навчального тренінгу керівного складу та провідних фахівців із ТОВ «Карбаз» і ТОВ «Боско».

Особистий внесок здобувача полягає в критичному аналізованні стану наукової проблеми, обґрунтуванні основної ідеї та формулюванні теми дисертаційного дослідження, розробленні основних наукових положень, програм і методик фізичних та математичних моделювань, узагальненні й визначенні достовірності одержуваних наукових результатів і формулюванні висновків, розробленні науково обґрунтованих практичних рекомендацій та алгоритмів числового розрахунку, оприлюдненні й практичному впровадженні результатів дисертаційного дослідження.

Внесок автора в праці, опубліковані в співавторстві, наведений у списку праць за темою дисертації.

Апробація результатів досліджень. Основні наукові положення й результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, симпозіумах і семінарах: International Research and Practice Conference «Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Technical Sciences» (м. Радом, Польща, 2017 р.), International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery (HERVICON + Pumps) (м. Суми, 2017, 2020 pp.), International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (м. Суми, 2019 р.), XXII Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Тернопіль, 2024 р.), науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому

виробництві» (м. Суми, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2024 рр.), XXIV Міжнародній науково-технічній конференції Асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики (АС ПГП) (м. Київ, 2024 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 37 наукових працях, із яких: статті в наукових фахових виданнях із переліку МОН України – 12 (зокрема, індексованих наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science – 3, із яких із квантилем Q2 – 2, квантилем Q3 – 1), статті в міжнародних виданнях, індексованих базами даних Scopus та/або Web of Science – 9 (зокрема, із квантилями Q1–Q2 – 5, квантилем Q3 – 1), публікації в матеріалах та працях конференцій – 13 (зокрема, індексованих базою даних Scopus – 2, із яких із квантилем Q3 – 1), патенти України на корисну модель – 2, дослідницькі дані (FAIR-дані) – 1.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 423 сторінки, із яких основного тексту – 386 сторінок.

Дисертаційна робота містить 42 таблиці, 171 рисунок, 402 найменування списку використаних джерел, розміщені на 41 сторінці, та 2 додатки – на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами й темами, наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів, а також особистий внесок здобувача в проведені дослідження й відповідні наукові публікації.

У першому розділі «Огляд літературних джерел та поставлення завдань досліджень» проаналізовано наукові праці за тематикою дисертаційної роботи. Зокрема, розглянуто гідродинамічні особливості двофазних потоків і можливість інтенсифікації процесів витікання повітряно-абразивної суміші завдяки накладанню вібраційного впливу.

Проаналізовано та узагальнено теоретичний опис газодинамічних процесів витікання повітряно-абразивної суміші через сопла різних форм із урахуванням впливу наявності абразивного матеріалу й реальних властивостей течії на її структуру з метою пошуку резервів щодо підвищення ефективності робочого сопла та обґрунтування напрямів наукових досліджень.

Проаналізовано ерозійні процеси, що мають місце в процесі абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів. Установлено, що геометричні та режимні параметри абразивоструменевого сопла відіграють ключову роль щодо впливу на час і якість оброблення. Акцентовано на дослідженні значень тиску, швидкості та витрати повітряно-абразивної суміші в абразивоструменевому соплі для підвищення інтенсивності робочого процесу у відповідному технологічному обладнанні. Приділено увагу дослідженню ефектів, що супроводжують процес абразивоструменевого оброблення

матеріалу. Розглянуто явище утворення ефекту Вентурі, стрибків ущільнень, ерозії сопла та оброблюваної поверхні. Приділено увагу процесу вдаряння частинок піску об оброблювану поверхню та проаналізовано відповідні моделі. Також проаналізовано способи визначення значень робочих параметрів абразивоструменевого сопла та сфери застосування результатів досліджень.

Наявні абразивоструменеві сопла мають високу собівартість та працюють здебільшого завдяки використанню зносостійких матеріалів. Вони не адаптовані до обмежених значень величини витрати суцільної фази, виконання чищення у важкодоступних місцях, регулювання кутів розпилення абразивного матеріалу, концентрації абразивних частинок у суцільній фазі, варіації сили удару абразивних частинок об оброблювану поверхню та ін.

Спираючись на критичний огляд сучасних наукових джерел, наведених у першому розділі, встановлено перелік невирішених наукових проблем, пов'язаних із процесами, що виникають під час руху повітряно-абразивної суміші в робочому соплі пневмоабразивного обладнання, а також вибрано об'єкт та предмет дослідження. Обґрунтовано, що вибрана тема дисертаційної роботи є актуальною, а запропоновані мета та завдання дослідження мають наукову новизну й практичну значущість. Виявлено невикористані резерви щодо підвищення ефективності абразивоструменевих сопел унаслідок зміни геометричних та режимних параметрів їх роботи, зміни організації руху повітряно-абразивної суміші всередині сопла.

У другому розділі «Методологія наукових досліджень» описано методологію проведення дисертаційного дослідження. Для виконання дисертаційної роботи вибрано сучасні методи аналітичного й імітаційного моделювання та експериментальних досліджень (рис. 1).

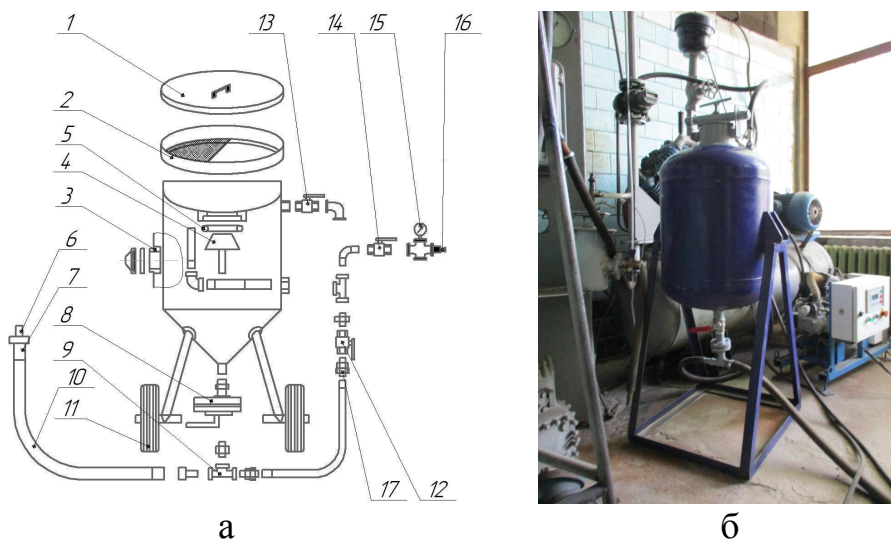


Рисунок 1 – Схема (а) і фото (б) експериментальної установки:
 1 – кришка; 2 – сито; 3 – люк; 4 – конус затворний; 5 – кільце затворне;
 6 – кільце абразивоструминне; 7 – соплотримач; 8 – затвор піщаний;
 9 – трійник; 10 – рукав; 11 – колеса; 12 – клапан повітряний;
 13 – клапан спускний; 14 – клапан увідний; 15 – манометр; 16, 17 – з'єднання

За основу створення математичних моделей руху повітряно-абразивної суміші всередині сопла вибрано теоретичну та обчислювальну гідродинаміку, теорію коливань та гідроаеропружності в поєднанні з методами визначення параметрів математичної моделі за даними експериментальних досліджень. Розроблено методики проведення числових та експериментальних досліджень, що відрізняються від наявних постановкою й методами проведення серії досліджень із накладанням механічних коливань як на стінки самого сопла, так і на ємність з абразивним матеріалом.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів наукового дослідження запропоновано розробити методи оцінювання параметрів математичних моделей за одержаними результатами експериментальних досліджень у широкому діапазоні зміни геометричних і режимних параметрів та з комплексним застосуванням регресійного аналізу для достовірного оцінювання впливу значущих факторів на робочі характеристики абразивоструменевого сопла.

У третьому розділі «Наукові основи гідромеханічних процесів абразивоструменевого оброблення поверхонь» викладено науково-теоретичні основи процесу абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів. Зокрема, досліджено гідродинаміку повітряно-абразивного потоку в соплі з вібрувальною стінкою.

Уточнено математичну модель руху частинок дисперсної фази в газовому потоці. Виведено залежність для визначення кута відхилення дисперсних частинок у робочому соплі пневмоабразивної установки. Аналітично доведено, що менші кути розпилення відповідають наявності більш інертних частинок дисперсної фази, що підтверджується на практиці. Аналітично встановлено залежність кута відхилення частинок дисперсної фази від частоти накладених коливань. Експериментально встановлено значення кутів розпилення в діапазоні $2\theta = 3-8^\circ$ для різних частот коливань.

Для описування руху частинок піску в соплі пневмоабразивної установки запропонована уточнена математична модель у двовимірній нестационарній постановці, що враховує наявні рівняння, проте вони доповнені компонентами гідравлічного опору на тертя та сил Бассе в дробово-диференціальній формі:

$$\begin{cases} \left(1 + \frac{2}{3}\gamma\right) \frac{d}{dt} u_p + \beta u_p = \beta u + \frac{2}{3}\gamma \frac{d}{dt} u + \frac{9}{\rho_p d_p} \sqrt{\mu\rho} \frac{d^{\frac{1}{2}}}{dt^{\frac{1}{2}}} (u - u_p) + \frac{3}{4}\zeta \frac{\rho}{\rho_p} \frac{1}{d_p} (u - u_p)^2; \\ \left(1 + \frac{2}{3}\gamma\right) \frac{d}{dt} v_p + \beta v_p = -(1 - \gamma)g + \beta v + \frac{2}{3}\gamma \frac{d}{dt} v + \frac{9}{\rho_p d_p} \sqrt{\mu\rho} \frac{d^{\frac{1}{2}}}{dt^{\frac{1}{2}}} (v - v_p) + \frac{3}{4}\zeta \frac{\rho}{\rho_p} \frac{1}{d_p} (v - v_p)^2, \end{cases} \quad (1)$$

де x, y – поздовжня та поперечна координати, м; t – час, с; u, v – компоненти швидкості частинок газового потоку, м/с; u_p, v_p – компоненти швидкості частинок піску, м/с; ρ, ρ_p – густини суцільної й дисперсної фаз відповідно, кг/м³; μ – динамічна в'язкість повітря за заданих умов, Па · с; $\gamma = \rho/\rho_p$ – безрозмірний фактор густини; $\beta = 1/\tau$ – інерційний фактор, с⁻¹; τ – стала часу, с; ζ – коефіцієнт гідродинамічного опору для двофазного потоку.

Варіація компонентів швидкості дисперсної фази визначається варіаціями швидкостей суцільної фази в збуреному потоці $\delta u_p = U(\omega) \delta u$, $\delta v_p = V(\omega) \delta v$ та комплексними передавальними функціями:

$$U(\omega) = \frac{\beta + \frac{2i}{3} \gamma \omega + \frac{9(1+i)}{\rho_p d_p} \sqrt{\frac{1}{2} \mu \rho \omega} + \frac{3}{2} \zeta \frac{\rho}{\rho_p} \frac{1}{d_p} (u_0 - u_{p0})}{i \omega + \frac{9(1+i)}{\rho_p d_p} \sqrt{\frac{1}{2} \mu \rho \omega} + \beta + \frac{3}{2} \zeta \frac{\rho}{\rho_p} \frac{1}{d_p} (u_0 - u_{p0})} e^{i\varphi}, \quad (2)$$

$$V(\omega) = \frac{\beta + \frac{2i}{3} \gamma \omega + \frac{9(1+i)}{\rho_p d_p} \sqrt{\frac{1}{2} \mu \rho \omega}}{i \omega + \frac{9(1+i)}{\rho_p d_p} \sqrt{\frac{1}{2} \mu \rho \omega} + \beta} e^{i\varphi}.$$

Аналітична залежність

$$\theta(y) = \text{arctg} \frac{4 \pi \rho_p}{m_p} \frac{a \omega}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} y^2, \quad (3)$$

де a – амплітуда вібропереміщення, м; ω – частота, рад/с, що відповідає експериментально встановленим значенням кутів розпилення в діапазоні $2\theta = 3-8^\circ$ для різних частот коливань (рис. 2).

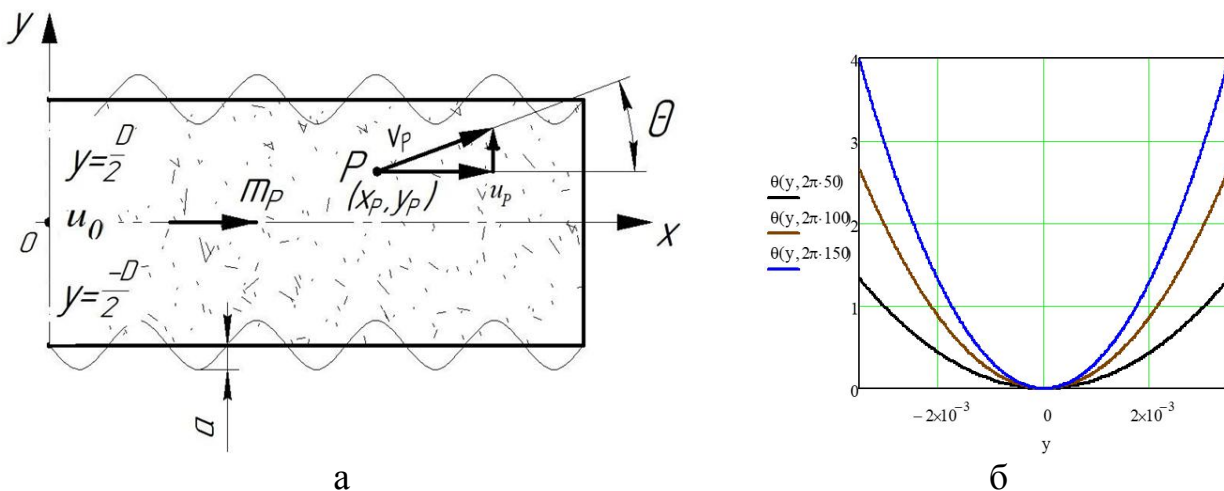


Рисунок 2 – Розрахункова схема гідродинаміки потоку (а) та кути розпилення, одержані розрахунковим методом (б)

Вона містить сталу часу, експериментально визначену за максимальним кутом розпилення (менші кути відповідають більш інертним частинкам):

$$\theta_{\max} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \theta = \text{arctg} \frac{\pi D^2 \rho_p}{m_p} \frac{a}{\tau}, \quad \tau = \frac{\pi D^2 \rho_p a}{m_p \text{tg}(\theta_{\max})}. \quad (4)$$

Також розроблено математичну модель турбулентного руху повітряно-абразивної суміші в соплі з тангенціальним підведенням для оброблення внутрішніх поверхонь артилерійських систем (рис. 3).

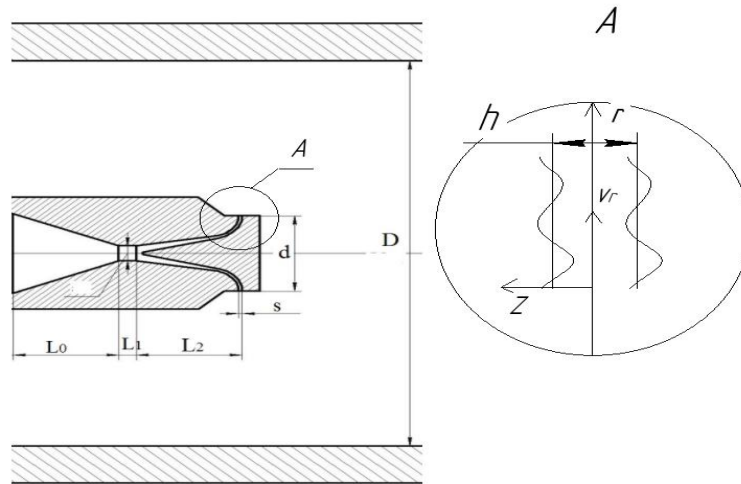


Рисунок 3 – Схема течії в соплі з тангенціальним підведенням

Рух суміші обумовлений перепадом тиску на вході p_1 і виході p_2 . У разі малих зазорів осереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса для розвиненої турбулентної течії вироджується в спрощене рівняння в радіальному напрямку:

$$\rho \frac{d}{dt} v_r + v_r \frac{d}{dr} v_r = -\frac{d}{dr} p + \mu \frac{d^2}{dr^2} v_r - \rho \frac{d}{dz} \overline{(v_r v_z)}, \quad (5)$$

де v_r – радіальна компонента швидкості суміші, м/с; μ – динамічна в'язкість, Па · с; ρ – густина суміші, кг/м³; p – тиск, Па; r – радіус, м.

Сили в'язкого та уявного турбулентного тертя виражаються через середній швидкісний напір:

$$\mu \frac{d^2}{dr^2} v_r - \rho \frac{d}{dz} \overline{(v_r v_z)} = \frac{\zeta}{2h} \frac{\rho v_{r-av}^2}{2}, \quad (6)$$

де ζ – коефіцієнт опору, що визначається за допомогою оцінювання параметрів за розподілом тиску (9); v_{r-av} – середня швидкість, розраховувана за масовою витратою суміші в перерізі каналу на довільному радіусі r :

$$v_{r-av} = \frac{q}{2\pi r h}, \quad (7)$$

де q – об'ємна витрата суміші.

Функція тиску набирає такого вигляду:

$$p = p_1 - \frac{1}{16} \zeta \rho \frac{r_1^3}{r h_0^3} (r_2 - r_1)^2 (r - r_1) \frac{d}{dt} \delta h^2, \quad (8)$$

де h – ширина зазору, м; $d\delta h/dt$ – віброшвидкість, м/с; h_0 – торцевий зазор, м.

Також розроблено математичну модель ерозії матеріалу оброблюваної поверхні на основі розгляду плоскої течії повітряно-абразивної суміші з частинками середнього діаметра d . Взаємодія струменя з металевою поверхнею під кутом φ призводить до ерозії поверхні глибиною Δ (рис. 4).

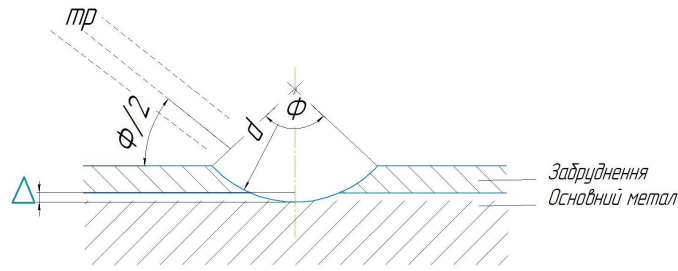


Рисунок 4 – Розрахункова схема процесу ерозії

Диференціальне рівняння зміни з часом глибини

$$\frac{d}{dt} \Delta = \frac{\frac{d}{dt} m_0}{2 \rho b \sqrt{d} \Delta} \quad (9)$$

дозволяє встановити узагальнену залежність для швидкості ерозії:

$$v(\Delta) = \frac{K_e \Lambda}{\sqrt{\Delta}}, \quad (10)$$

де введені такі параметри:

$$K_e = \frac{1}{\Lambda} \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{\sqrt{\Delta_i}}}{\left(\sum_{i=1}^N \Delta_i\right)^{-1}}, \quad \Lambda = \frac{\dot{m}_p}{\rho d_s^{\frac{3}{2}}}. \quad (11)$$

Запропоновано математичну модель оцінювання впливу геометричних параметрів на коефіцієнт витрати сопла. Оскільки масова витрата прямо залежить від прохідного перерізу сопла, запропоновано таку залежність:

$$\dot{m}(d) = \dot{m}_{\min} \frac{d^n}{d_{\min}^n}, \quad (12)$$

де d – внутрішній діаметр сопла, м; d_{\min} – мінімальний діаметр сопла, м.

Масова витрата \dot{m}_{\min} для сопла мінімального діаметра та показник n визначаються за даними експериментальних досліджень за такою залежністю:

$$\dot{m}_{\min} = \exp \frac{\sum_{i=1}^N \ln(m_i) \sum_{i=1}^N \ln^2 \frac{d_i}{d_{\min}} - \sum_{i=1}^N \ln \frac{d_i}{d_{\min}} \sum_{i=1}^N \ln(m_i) \ln \frac{d_i}{d_{\min}}}{\sum_{i=1}^N \ln^2 \frac{d_i}{d_{\min}} - \sum_{i=1}^N \ln \frac{d_i}{d_{\min}}}, \quad (13)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N \ln(m_i) \ln \frac{d_i}{d_{\min}} - \sum_{i=1}^N \ln(m_i) \sum_{i=1}^N \ln \frac{d_i}{d_{\min}}}{\sum_{i=1}^N \ln^2 \frac{d_i}{d_{\min}} - \sum_{i=1}^N \ln \frac{d_i}{d_{\min}}}. \quad (14)$$

Згідно з формулами (14)–(15) $\dot{m}_{\min} = 0,025$ кг/с, $n = 2,12$.

Теоретично визначені значення витрат узгоджуються з експериментально одержаними даними. Підвищення значення масової витрати через сопло приводить до пропорційного підвищення сили реакції струменя (рис. 10).

У цьому разі застосовується лінійна апроксимація коефіцієнта витрат. Зокрема, у разі зростання витрат унаслідок збільшення внутрішнього діаметра за постійного перепаду тиску

$$\mu(d) = \mu_{\min} + \alpha (d - d_{\min}), \quad (15)$$

де умовний коефіцієнт витрат сопла μ_{\min} із мінімальним діаметром d_{\min} і коефіцієнт α визначаються за експериментальними даними:

$$\mu_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i \Delta d_i^2 - \sum_{i=1}^N \Delta d_i (\mu_i \Delta d_i)}{\sum_{i=1}^N \Delta d_i^2 - \sum_{i=1}^N \Delta d_i^2}, \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_i \Delta d_i) - \mu_{\min} \sum_{i=1}^N \Delta d_i}{\sum_{i=1}^N \Delta d_i^2 - \sum_{i=1}^N \Delta d_i^2}. \quad ((17))$$

Оцінені параметри становлять $\mu_{\min} = 1,10$ та $\alpha = 1,27$.

Було розглянуто робочий насадок із пористою вставкою (рис. 5).

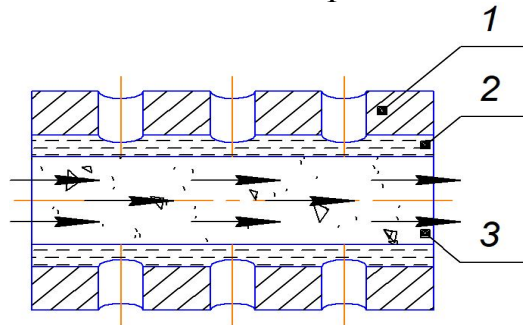


Рисунок 5 – Розрахункова схема формування повітряного шару на внутрішній поверхні сопла:

- 1 – циліндрична перфорована вставка сопла; 2 – повітряний шар;
3 – повітряно-абразивний потік

З огляду на те, що немає теоретичного узагальнення складного механізму витікання абразивно-повітряної суміші, для оцінювання коефіцієнта витрат через отвір із гострими краями була застосована формула Стодоли, доповнена емпіричними коефіцієнтами, що враховують особливості витікання абразиву:

$$\dot{m} = \mu f K \sqrt{\frac{\rho_1}{z p_1} (p_1^2 - p_2^2)}, \quad ((18))$$

де \dot{m} – масова витрата повітряно-абразивної суміші, кг/с; μ – коефіцієнт витрат сопла; f – площа поперечного перерізу, м²; K – коефіцієнт; ρ_1 – густина суміші на вході, кг/м³; z – кількість отворів; p_1, p_2 – тиски на вході та виході, Па.

Припускаючи, що коефіцієнт витрати μ пропорційний тиску на вході p_1 , у разі значних перепадів тиску ($p_1 \gg p_2$) одержані експериментальні дані можуть бути апроксимовані такою аналітичною залежністю:

$$\dot{m}(p_1) = C p_1^{\alpha+0,5} f \sqrt{\frac{\rho_1}{z}}, \quad (19)$$

де α – показник, що відображає вплив коефіцієнта витрати μ на масову витрату \dot{m} ; C – інтегральний параметр:

$$C p_1^\alpha = \mu K. \quad (20)$$

Зміна параметрів

$$D = \ln C f \sqrt{\frac{\rho_1}{z}}; \beta = \alpha + \frac{1}{2}; \dot{m}(p_1) = e^D p_1^\beta \quad (21)$$

дозволяє визначити невідомі параметри α та C за допомогою найкращого узгодження теоретичної залежності з експериментальними даними – мінімізації сумарної квадратичної похибки:

$$RMSE(D, \beta) = \sum_{i=1}^n (D + \beta \ln(p_{1i}) - \ln(\dot{m}_i))^2 \rightarrow \min, \quad (22)$$

де n – загальна кількість експериментальних даних; i – номер експерименту; p_{1i} – виміряне значення вхідного тиску p_1 , Па; \dot{m}_i – виміряне значення масової витрати, кг/с.

У результаті одержані вирази для визначення параметрів (22):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(p_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(p_{1i}) \ln(\dot{m}_i) - \sum_{i=1}^n \ln^2(p_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(\dot{m}_i)}{[\sum_{i=1}^n \ln(p_{1i})]^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n \ln^2(p_{1i})}; \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(p_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(\dot{m}_i) - n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(p_{1i}) \ln(\dot{m}_i)}{[\sum_{i=1}^n \ln(p_{1i})]^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n \ln^2(p_{1i})}. \quad (24)$$

Шукані значення параметрів α та C обчислені за формулами:

$$C = (z/\rho_1)^{1/2} e^D / f, \alpha = \beta - 0,5. \quad (25)$$

Для оптимізації промислового сопла UDC 32-450 на піщано-повітряній суміші було проведено числові дослідження в програмному комплексі ANSYS. Задавали густину частинок піску та їх діаметр. Під час проведення числових досліджень теплообмін між піском, повітрям та стінками сопла не враховували, абразивний матеріал моделювали одним значенням діаметра, піщинки були однакової форми у вигляді кульок рівного діаметра.

Вибирали два робочих середовища: «fluid» – повітря, та «particle» – частинки піску із заданим діаметром у діапазоні $d = 0,1-0,8$ мм та змінною масовою витратою.

Для «fluid» вибирали модель турбулентності SST, модель «Total Energy», для частинок – масову витрату. На вході для «fluid» задавали повний тиск і температуру, на виході – тиск. На стінці задавали шорсткість 3,2 мкм.

На рисунку 6 продемонстровано, що зі збільшенням дифузornoї частини сопла значення контактних напружень на оброблюваній поверхні від удару піску зростає, що позитивно впливає на робочі характеристики сопла. Це відбувається завдяки тому, що в разі збільшення дифузornoї частини сопла значення швидкості повітряно-абразивної суміші на його зрізі зростає, що

приводить до підвищення значення напруження на оброблюваній поверхні від удару піску.

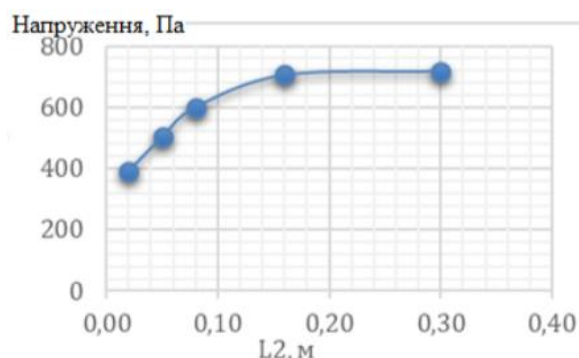
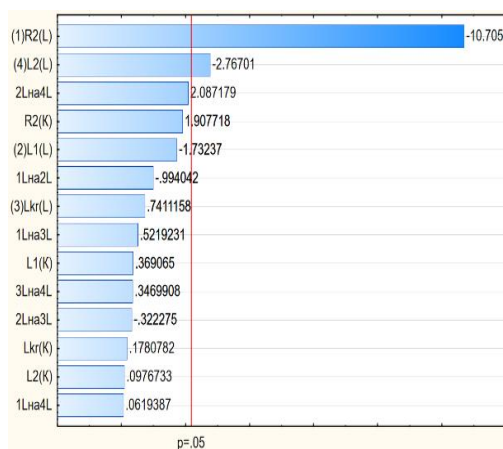
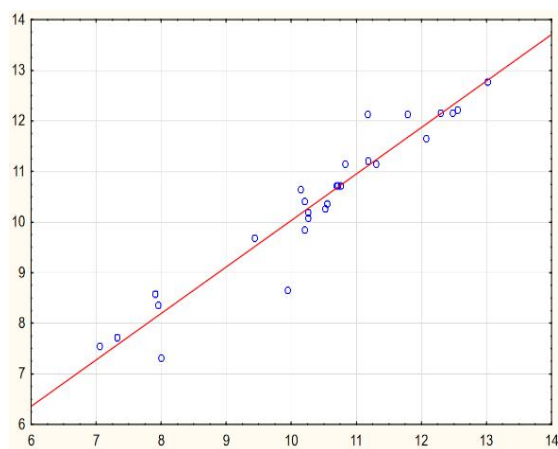


Рисунок 6 – Зміна контактних напружень на оброблюваній поверхні від удару піску за довжиною дифузornoї частини

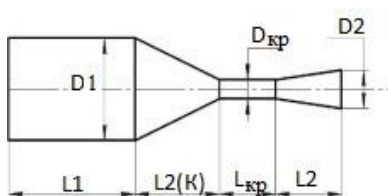
Також встановлено, що значущими факторами, які впливають на ефективність сопла, є значення довжин $L_{кр}$ та L_2 його критичної й дифузornoї частин відповідно (рис. 7). Число в дужках означає номер параметра (1–4), (L) – лінійна залежність, (K) – квадратична залежність; «на» означає взаємний вплив перехресних параметрів. Параметр за номером (1) має найбільший вплив, за номером (4) – найменший.



а



б



в

Рисунок 7 – Виявлення значущих факторів ефективності сопла:
а – вплив значень довжини сопла на реактивну силу струменя;
б – кореляція впливу оцінюваних параметрів; в – геометричні розміри сопла

Виконано оптимізацію проточної частини сопла Вентурі завдяки збільшенню довжини дифузорної частини сопла. Графічне подання окремих одержаних результатів наведено на рисунку 8.

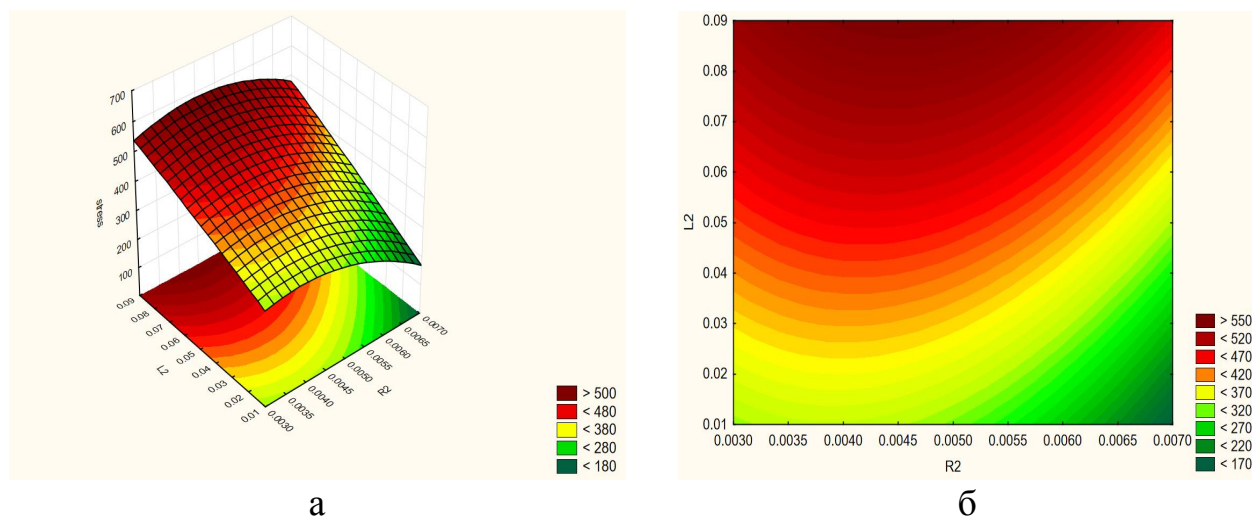


Рисунок 8 – Розподіл шуканих параметрів:
а – поверхня відгуку; б – контактні напруження, Па

Установлено підвищення значень контактних напружень на оброблюваній поверхні від удару піску за довжиною дифузорної частини L_2 , що позитивно характеризує сопло. Також установлено, що найбільш значущими геометричними розмірами сопла є такі: вихідний радіус R_2 , довжина критичної ділянки $L_{кр}$ та довжина дифузорної частини L_2 . Визначено різницю у структурі робочої течії в соплах із різними значеннями довжини дифузорної частини в діапазоні $L_2 = 0,02-0,30$ м.

Доведено, що зі збільшенням значення довжини дифузорної частини сопла Вентурі підвищується його ефективність. Під час проектування сопла Вентурі для пневмоабразивної установки необхідно виконувати його дифузорну частину значно довшою, а саме $L_2 = 0,15-0,30$ м. Виготовлення сопла з L_2 більше ніж 0,3 м є нетехнологічним, а використання – недоцільним.

З одержаних даних спостерігаємо відмінності щодо течії повітряно-абразивної суміші. Зокрема, встановлена наявність зворотного руху абразивних частинок після удару об оброблювану поверхню: деякі частинки повертаються назад; після цього, загальмувавши набіжний потік, вони знову набирають швидкості.

Отже, значення контактних напружень на оброблюваній поверхні та швидкість робочої суміші також можуть бути показниками ефективності сопла на рівні з його коефіцієнтом витрати, оскільки є взаємозв'язаними чинниками: зростання їх значень приводить до скорочення часу оброблення одиниці поверхні матеріалу (рис. 10–11).

У четвертому розділі «Експериментальні та числові дослідження робочого процесу в пневмоабразивному обладнанні» наведено наукові основи витікання повітряно-абразивної суміші через робоче сопло пневмоабразивного обладнання. Розглянуто питання гідродинаміки повітряно-абразивної суміші

в робочому соплі. Відпрацьовано алгоритм числового моделювання робочого процесу в соплі пневмоабразивного обладнання. Під час проведення випробувань за несучий потік використовували повітря, а за абразивний матеріал – річковий пісок зернистістю 0,1–0,8 мм та густиною 1 500–1 700 кг/м³.

Досліджувані моделі робочих сопел мали різні геометричні розміри та конфігурацію (рис. 9). Дослідження виконували для діапазону від конструкцій циліндричних сопел малої довжини до довгих сопел зі змінною проточною частиною. Також дослідженню підлягали розроблені конструкції сопел та відповідних пристроїв для оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб та виробів оборонного призначення.

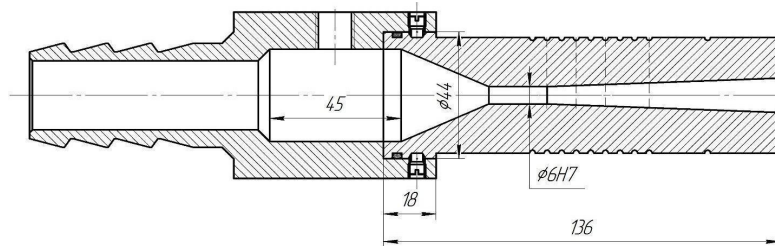


Рисунок 9 – Геометрія сопла Вентурі UDC 32-450 ($d_{кр} = 6,0$ мм)

Експериментально встановлено, що абразив дрібної фракції не впливає на реактивну силу струменя. Істотний вплив проявляється в разі збільшення діаметра фракційного складу піску, що призводить до зниження реактивної сили. Зокрема, експериментально порівнявши отримані характеристики з аналітично визначеними, одержали узгодження результатів числового та фізичного моделювання (рис. 10).

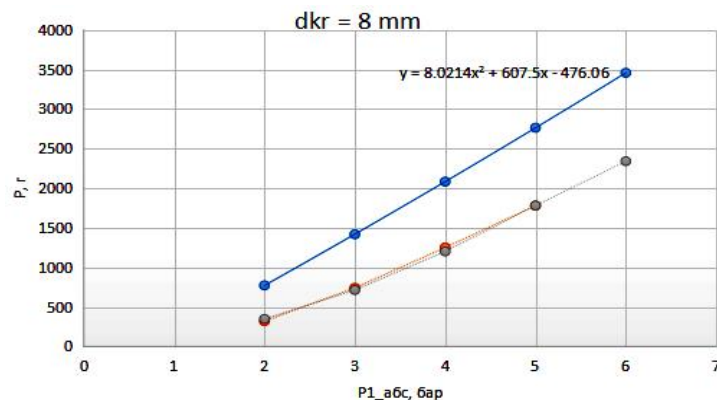


Рисунок 10 – Результати досліджень потоку для сопла Вентурі:

$$d_{кр} = 0,2 \text{ мм}, d = 8 \text{ мм}, L = 194 \text{ мм};$$

червоний – експеримент, сірий – ANSYS, синій – ідеальний процес (без втрат)

Одержаний результат пояснюється інерційною складовою руху частинок абразивного матеріалу. Водночас збільшення подавання піску призводить до зменшення кількості повітря, що спричиняє зниження реактивної сили.

У п'ятому розділі «Вплив геометричних та режимних параметрів абразивоструменевого сопла на робочий процес пневмоабразивного обладнання» викладено основні результати виконаних досліджень для абразивоструменевих сопел різної геометричної форми в широкому діапазоні

зміни режимних параметрів. Зокрема, наведено результати числових та експериментальних досліджень циліндричного робочого сопла для абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалу зі змінними геометричними параметрами. Дослідження здійснювали з метою виявлення резервів щодо підвищення продуктивності сопел і забезпечення енергоефективності пневмоабразивного обладнання.

На першому етапі досліджували циліндричне сопло (рис. 11).

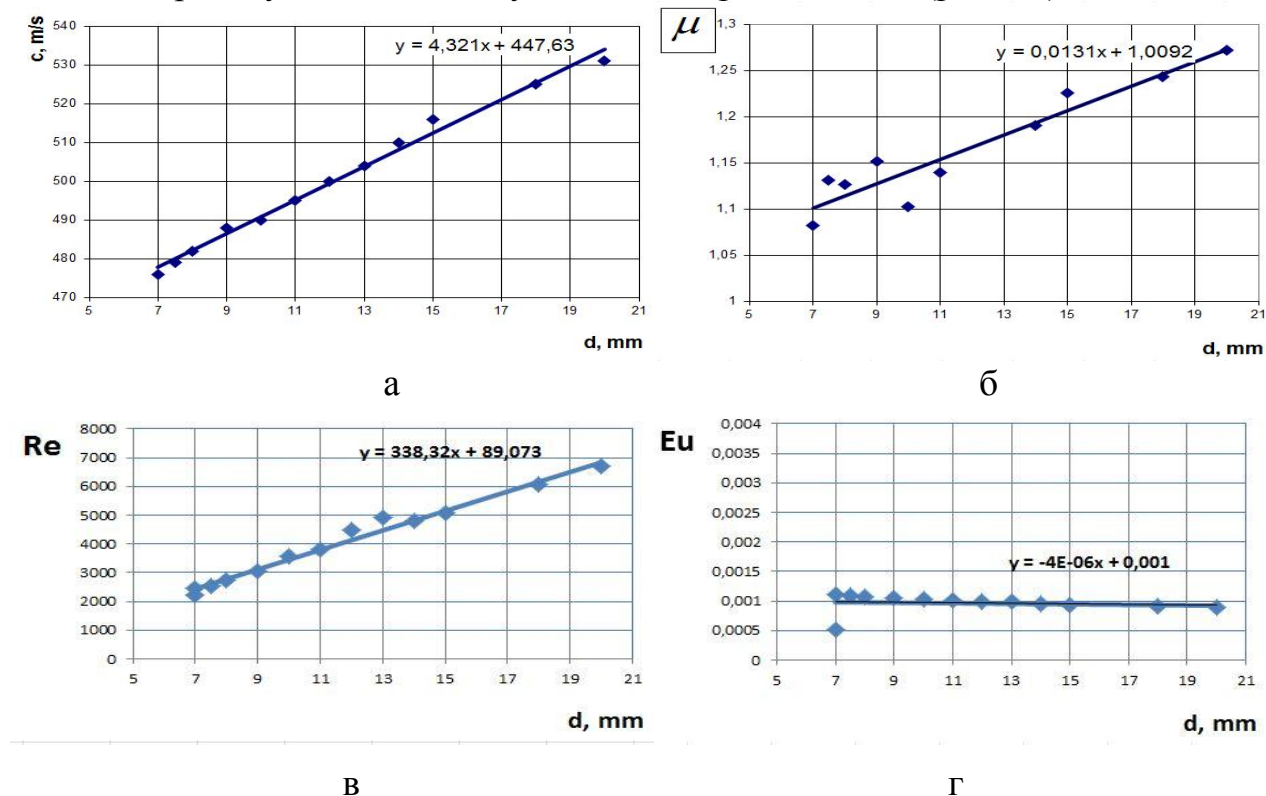


Рисунок 11 – Залежність впливу швидкості на виході з сопла c (а), умовного коефіцієнта витрати μ (б), числа Рейнольдса Re (в) та числа Ейлера Eu (г) від діаметра d

Установлено різницю у структурі течії в робочих соплах із різними внутрішніми діаметрами в діапазоні 7–20 мм (зокрема, для діаметра 7 мм спостерігали зміну параметрів потоку на виході).

Експериментальні дослідження й аналітичні наближення дозволили оцінити умови підвищення енергоефективності пневмоабразивного обладнання. Зокрема, час оброблення одиниці площі металевої поверхні скорочено в 4,5 раза завдяки використанню сопел із більшими значеннями їх коефіцієнтів витрати. Умовний коефіцієнт витрати μ урахує особливості течії повітряно-абразивної суміші. Загалом енергоефективність компресорного обладнання для пневмоабразивної установки підвищилася на 20 %.

Таблиця 1 демонструє зростання коефіцієнта витрати μ зі збільшенням діаметра сопла d . Це пояснюється тим, що швидкість потоку абразивної суміші через сопло збільшується.

Таблиця 1 – Геометричні й експлуатаційні параметри насадків

№ пор.	d , мм	l , мм	m_e , кг/с	m_t , кг/с	μ
1	2	22	0,002	0,002	0,981
2	4	22	0,008	0,008	1,060
3	5	22	0,013	0,012	1,060
4	6	22	0,019	0,017	1,119
5	7	4	0,044	0,023	1,904
6	7	44	0,024	0,023	1,038
7	7	44	0,053	0,023	2,272
8	14	44	0,100	0,092	1,082

Також було виявлено, що зменшення довжини циліндричного сопла (до 4 мм) збільшує швидкість потоку більше ніж у 2,0 раза, збільшуючи водночас масову витрату суміші та коефіцієнт витрат. Отже, виявлено можливість підвищення продуктивності абразивоструменевого оброблення. Наприклад, час оброблення 1 м² металу скоротився до 2 хв.

Застосування перфорованої вставки приводить до підвищення ефективності роботи сопла більше ніж 2,0 раза. Також експериментально одержано числові характеристики технологічних параметрів абразивоструменевого оброблення. Розбіжність результатів числових моделювань не перевищує 2 %. Зі збільшенням значення коефіцієнта витрати сопла збільшуються кількість абразивного матеріалу та швидкість його проходження, тому скорочується час оброблення поверхні матеріалу.

Геометричні та робочі параметри циліндричних сопел наведені в таблиці 2, яка свідчить, що зі збільшенням внутрішнього діаметра сопла збільшується його масова витрата. Також середнє значення коефіцієнта витрат μ становить близько 1,0. В останньому рядку таблиці 2 наведено результати для сопла, оснащеного перфорованою вставкою. Вона має найвищі значення масової витрати 0,023 кг/м³ і коефіцієнта витрати сопла 2,27. Відповідно до рівнянь (24) та (25) за експериментальними даними одержано такі значення: $D = -6,62$, $\beta = 1,03$. Отже, після апроксимації залежність витрати повітря від його тиску можна подати як $\dot{m} = 1,34 \cdot 10^{-3} \cdot p_1^{1,03}$.

Таблиця 2 – Геометричні та робочі параметри циліндричних сопел

Геометричний розмір, м		Масова витрата, кг/с		Швидкість, м/с		Коефіцієнт витрати
діаметр	довжина	повітря	частинки	вхід	вихід	
0,007	0,044	0,024	0,023	288	453	1,04
0,014	0,044	0,100	0,092	270	481	1,08
0,007	0,004	0,044	0,023	523	794	1,90
0,006	0,022	0,019	0,017	262	470	1,12
0,005	0,022	0,013	0,012	279	463	1,06
0,004	0,022	0,008	0,008	273	457	1,06
0,002	0,022	0,002	0,002	244	466	0,98
0,007*	0,044	0,053	0,023	637	813	2,27

*Сопло з перфорованою вставкою

На рисунку 12 зображено дві криві для різного фракційного складу піску. У результаті одержано залежність впливу робочого тиску на шорсткість оброблюваної поверхні. З графіків бачимо, що застосування дрібнішої фракції дозволяє отримувати якіснішу поверхню, що пояснюється більшою площею контакту абразиву з оброблюваною поверхнею. Також встановлено вплив шорсткості внутрішньої поверхні сопла на ефективність його роботи, а саме незначна шорсткість поверхні сприяє зниженню швидкості витікання повітряно-абразивної суміші до 10 % порівняно з гідравлічно гладким соплом та скороченню питомого часу оброблення 1 м² поверхні від 3,0 хв до 1,8 хв.

Установлено, що масова витрата піску в досліджуваному діапазоні значень 0,05–0,10 кг/с (для цього сопла, цієї витрати та заданого діаметра) майже не впливає на швидкість дисперсної фази на виході з сопла.

Також встановлено вплив діаметра частинок на ефективність сопла. Чим дрібніша фракція, тим більшу швидкість вона має, що пояснюється зменшенням їх інерційних властивостей. Наприклад, наведені деякі візуалізації (рис. 13, 14).

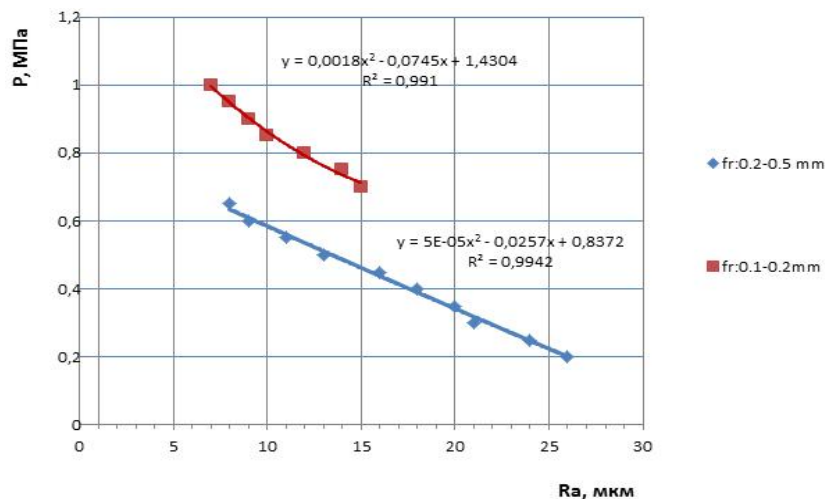


Рисунок 12 – Результати експериментальних досліджень впливу шорсткості поверхні

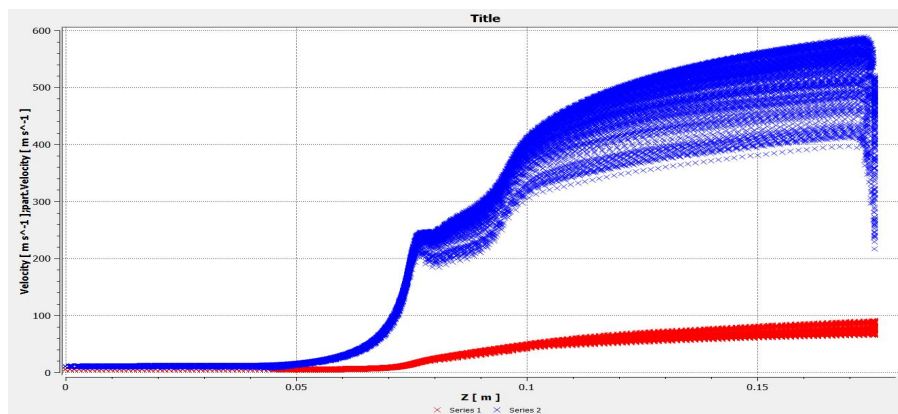


Рисунок 13 – Зміна робочих параметрів уздовж сопла:
 а – зміна швидкості за довжиною; б – зміна повного тиску суцільної фази;
 $\dot{m} = 0,057$ кг/с, $d_p = 0,8$ мм

Виконано розрахунок параметрів повітря в поточній частині сопел Вентурі різних геометричних розмірів залежно від надлишкового тиску на вході. Для підвищення ефективності сопла зменшувався вихідний переріз досліджуваних сопел. Також встановлено, що спрофільована геометрія сопла Вітошинського збільшує контактні напруження на оброблювальній поверхні на 13 % (підтверджено як чисельно, так і експериментально), тому є більш ефективною порівняно з традиційним звужувальним соплом.

Далі розглядається звукувальне сопло, спрофільоване за формулою Вітошинського, але без розширюваної частини. У результаті виявлено, що використання сопел Вентурі наведеної геометричної форми не є ефективним, оскільки такі сопла є надрозширеними. Для підвищення їх ефективності необхідно зменшувати вихідний переріз.

Накладання механічних коливань на робоче сопло приводить до збільшення щільності розподілу частинок. Течія без накладання вібрацій (рис. 15 а) має пульсаційний характер: повітряно-абразивний потік нерівномірний і має більші зони повітряних прошарків між абразивними частинками. Накладення вібрацій (рис. 15 б) приводить до підвищення щільності струменя і відповідно продуктивності оброблення поверхні.

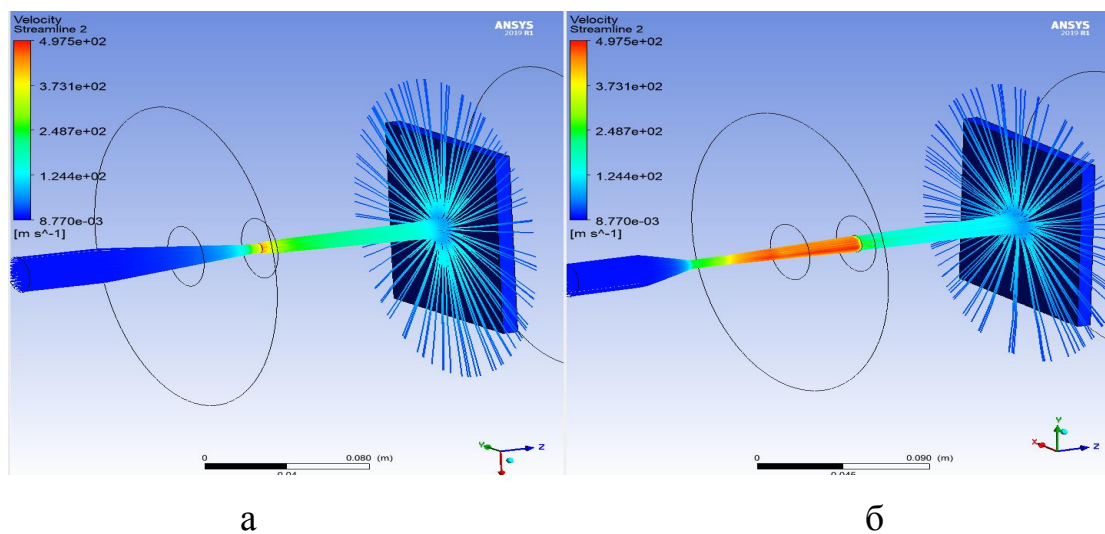


Рисунок 14 – Візуалізації витікання дисперсної (а) та суцільної (б) фаз



а



б

Рисунок 15 – Стробоскопічне дослідження руху двофазного потоку: а – без накладання коливань; б – із накладанням коливань частотою 100 Гц

Також у межах виконання серії фізичних досліджень повітряно-абразивної установки було встановлено доцільність застосування накладання вібрацій на ємність із піском за допомогою вібратора з частотою 40–60 Гц. Цей прийом дав змогу усунути ефект залипання піску впродовж 90 хв до повного закінчення абразивного матеріалу в ємності.

У шостому розділі «Практична реалізація результатів дисертаційного дослідження» наведено розроблені конструкції робочих сопел для застосування на практиці.

Складність оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб полягає у втраті реактивної сили струменя за довжиною її прольоту та складністю спрямування повітряно-абразивного струменя на внутрішню стінку на значній відстані від сопла. Оброблення внутрішніх поверхонь труб малої довжини супроводжується складністю рівномірного оброблення, особливо за наявності значних забруднень. Для подолання цих проблем було розроблено чотири конструкції пристроїв оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб. Також розроблено й запатентовано спеціальний пристрій (рис. 16), який дозволяє переміщувати соплотримач уздовж оброблюваної поверхні отвору.

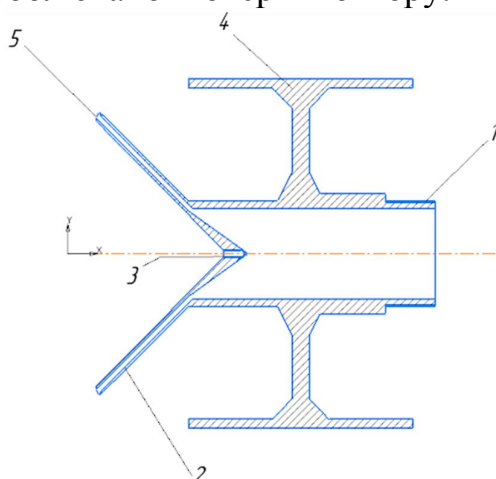


Рисунок 16 – Пристрій для абразивоструменевого чищення внутрішніх поверхонь глибоких забруднених отворів:

1 – рукав; 2 – напрямний апарат; 3 – отвір; 4 – рухомий корпус; 5 – сопло

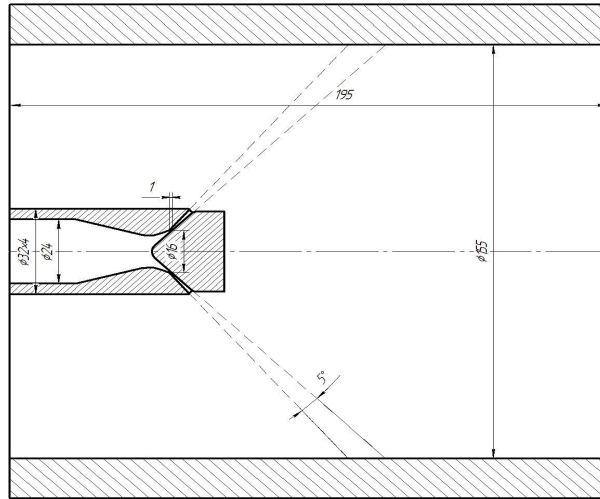
Дослідження виконували із використанням програмного комплексу ANSYS із подальшою перевіркою на експериментальному стенді. Моделювання виконували з імітацією оброблюваної поверхні труби з внутрішнім діаметром 155 мм, що відповідає артилерійському озброєнню калібру 6,1 дюйм. Розроблені пристрої дозволяють очищувати накопичені мідні відкладення та продукти згорання в канавках металевих поверхонь.

Нижче наведено декілька пристроїв, технічне виконання яких різняться. Досліджуваний пристрій (рис. 17) має форму кільцевого сопла, у якому критичний переріз розміщений на діаметрі $d = 16$ мм. Швидкості суцільної та дисперсної фаз наведені на рисунку 18.

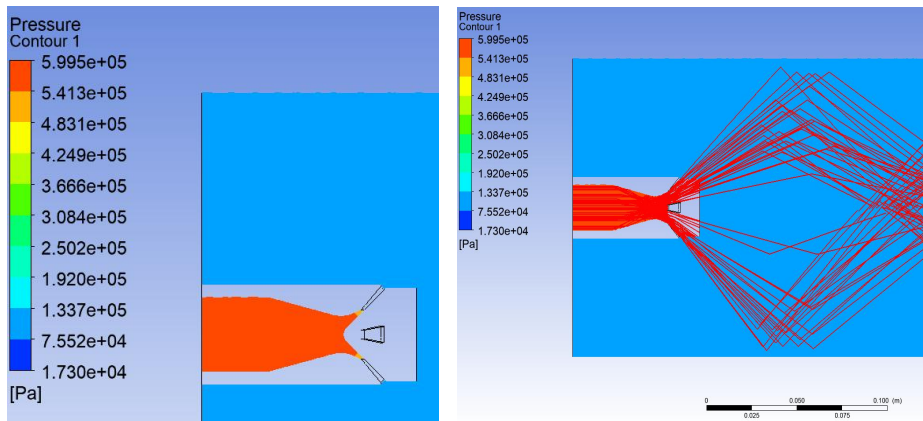
Друга досліджувана конструкція сопла звужується в напрямку до вихідного перерізу, проте має менше значення вихідної площі соплового

апарату (рис. 19). Рух частинок у зворотному напрямку зумовлений відбиванням абразивних частинок від оброблюваної поверхні.

Перегородки всередині сопла, що дозволили зменшити вихідну площу на виході, не дозволяють досягти позитивного ефекту щодо швидкості піску за рахунок появи додаткового гідравлічного опору.



а



б

в

Рисунок 17 – Числові дослідження пристрою 1 для чищення труб:
а – схема; б – зміна тиску за довжиною; в – траєкторії частинок піску

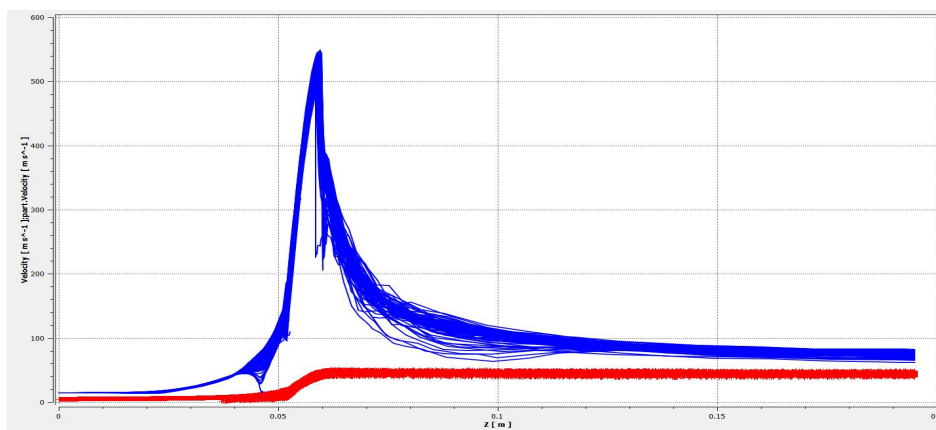


Рисунок 18 – Зміна швидкостей суцільної (синій колір)
та дисперсної (червоний колір) фаз

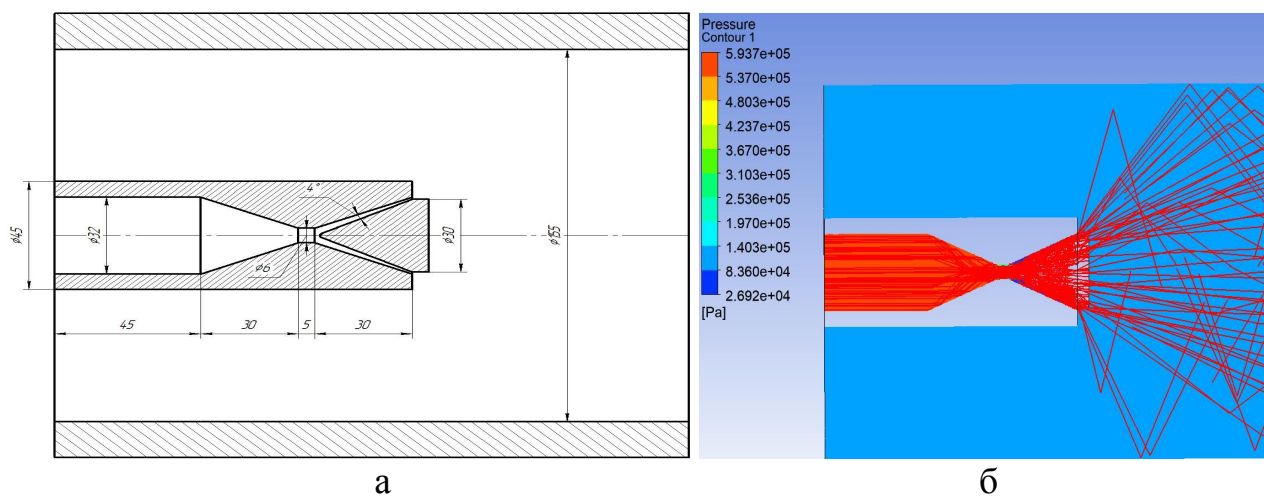


Рисунок 19 – Дослідження пристрою 2:
а – схема; б – траєкторії частинок піску

Третя досліджувана конструкція сопла (рис. 20) має розпирні перегородки всередині проточної частини для забезпечення міцності конструкції. На відміну від попередньої, ця конструкція має більшу площу розпилення абразивних частинок; це відбувається, зокрема, за рахунок зменшення площі перерізу. Збільшення площі розпилення приводить до скорочення часу оброблення поверхні.

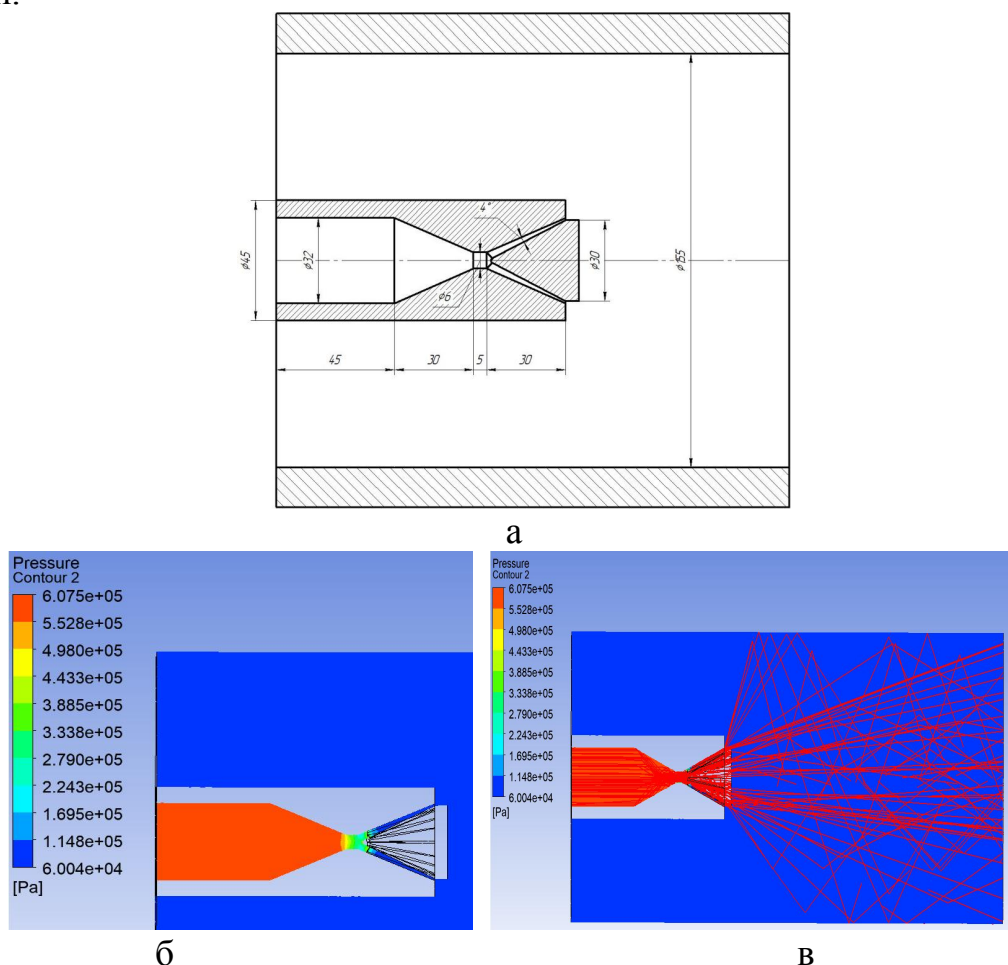


Рисунок 20 – Числове дослідження пристрою 3 для чищення труб:
а – схема; б – зміна тиску за довжиною; в – траєкторії частинок піску

Четверта досліджувана конструкція (рис. 21) має тангенціальне підведення повітряно-абразивної суміші. Наведені результати свідчать, що швидкість частинок піску менша за швидкість суцільної фази, що узгоджується з результатами, наведеними в п'ятому розділі для традиційних конструкцій робочих сопел.

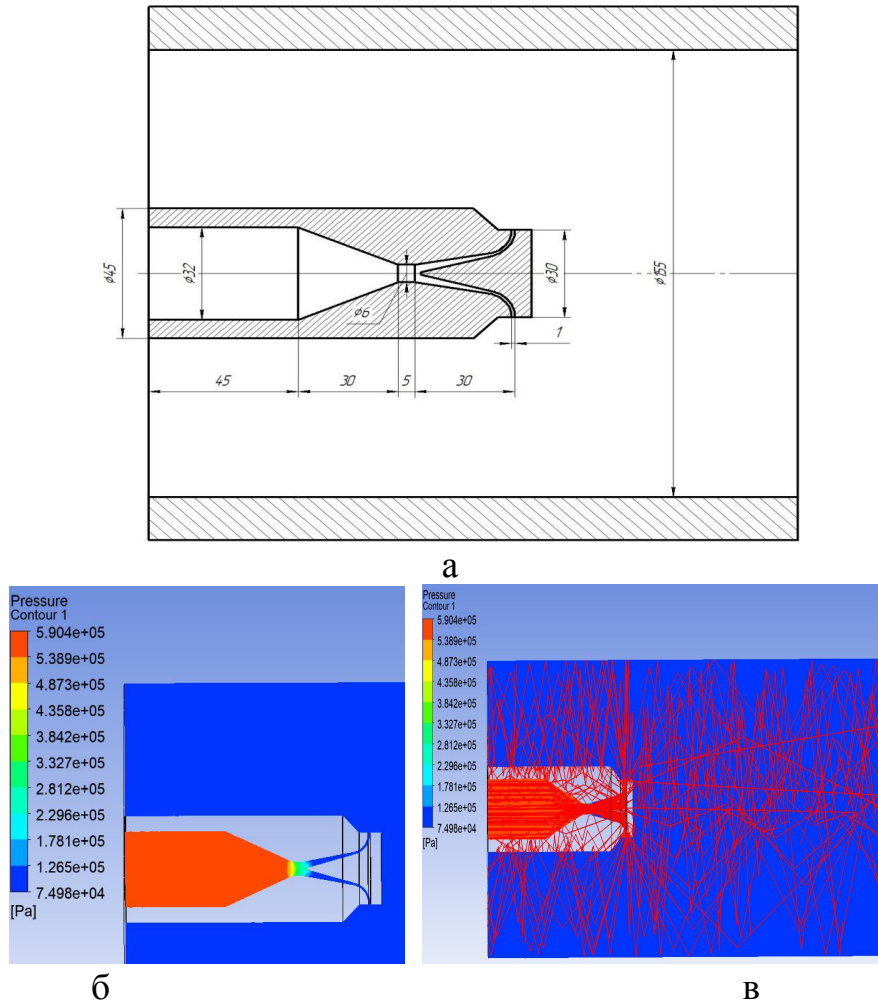


Рисунок 21 – Числове дослідження пристрою 4 для чищення труб:
а – схема; б – зміна тиску за довжиною; в – траєкторії частинок піску

З огляду на існування великої кількості різноманітних варіантів із різними довжинами й кутами виходу струменя необхідним є виконання спеціальних оптимізаційних досліджень для раціонального вибору пристрою для чищення внутрішніх поверхонь труб, що мають індивідуальні значення діаметрів. Проте варто зазначити, що для значних внутрішніх діаметрів оброблюваних внутрішніх циліндричних поверхонь необхідно застосовувати пристрій із подаванням повітряно-абразивного струменя під прямим кутом до поверхні.

Загалом результати числового моделювання двофазного середовища дозволили одержати кількісні характеристики руху твердих частинок повітряно-абразивної суміші, що дало змогу зменшити кількість виготовлених зразків для перевірки роботоздатності розробленого пристрою.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, розроблено та обґрунтовано наукові положення, висновки й рекомендації, сукупність яких репрезентує нові науково-обґрунтовані результати в галузі технічних наук, які дозволили вирішити важливу наукову проблему інтенсифікації й удосконалення процесів витікання повітряно-абразивної суміші з сопла пневмоабразивного обладнання шляхом розроблення науково-теоретичних основ процесу вібраційного впливу на двофазні системи, моделювання гідродинаміки робочого процесу, аналізу впливу процесів тертя й супутнього процесу ерозії поверхонь матеріалів на ефективність процесу абразивоструменевого оброблення.

Одержані науково-практичні результати полягають у такому:

1. Було розроблено методи визначення параметрів математичних моделей за одержаними результатами експериментальних досліджень у широкому діапазоні геометричних і режимних параметрів із комплексним застосуванням регресійного аналізу. Застосовані методи оцінювання параметрів для створення достовірних математичних моделей нестационарних, зокрема вібраційних, гідромеханічних процесів дозволили підтвердити достовірність одержуваних результатів.

2. На основі математичного моделювання отримано математичну модель ежекції повітря для створення повітряного прошарку в соплі Вентурі, що дозволило обґрунтувати можливість застосування цього процесу для зниження тертя в зоні розгону сопла в 4,0 раза. У результаті цього науково-теоретично обґрунтовано закономірності процесу витікання повітряно-абразивної суміші для практичної реалізації можливостей підвищення їх ефективності за рахунок зміни геометрії та виконання більш точних розрахунків робочих параметрів усередині сопла, а саме значень масових витрат суцільної та дисперсної фаз (0,053 кг/с для суцільної фази та 0,023 кг/с для дисперсної фази), значень швидкості абразивних частинок усередині сопла (300–820 м/с) та за його межами (340–700 м/с). Також розроблено математичну модель процесу витікання повітряно-абразивної суміші через робоче сопло пневмоабразивної установки, яка дозволила одержати уточнене значення коефіцієнта витрати сопла μ з урахуванням індивідуальних особливостей його геометрії та режимів роботи. У результаті створено методику числового моделювання гідродинамічних процесів у соплі пневмоабразивного обладнання. Показниками ефективності абразивоструменевого сопла є коефіцієнт витрати, значення швидкості повітряно-абразивної суміші на виході, сила реакції струменя, напруження на оброблюваній поверхні від удару абразивних частинок, час оброблення одиниці поверхні матеріалу.

3. На основі теоретичних досліджень одержані залежності турбулентного руху повітряно-абразивної суміші в соплі з тангенціальним підведенням. Це дозволило створити методику раціонального вибору геометричних і експлуатаційних характеристик під час створення пристрою абразивоструменевого оброблення внутрішніх поверхонь виробів ствольної

артилерії калібру 6,1. Розроблені пристрої впроваджені в практику чищення внутрішніх поверхонь довгих труб і рекомендовані для застосування в оборонній промисловості, оскільки дають змогу до 50 % скоротити час чищення ствола артилерійського знаряддя.

4. Розроблено пристрій для чищення внутрішньої поверхні довгих труб діаметром до 155 мм. Отримано візуалізації течії повітряно-абразивної суміші у виробках оборонного призначення з урахуванням струменя, що витікає з сопла, та його подальшого контактування з оброблюваною поверхнею.

5. На основі теоретичних досліджень розроблено математичну модель процесу передавання енергії від робочого потоку в соплі пневмоабразивного обладнання до оброблюваної поверхні, на основі якої розроблено методику визначення параметрів процесу очищення оброблюваного матеріалу. Також створено методику оцінювання впливу геометричних параметрів на коефіцієнт витрати сопла. Розроблена математична модель турбулентного руху повітряно-абразивної суміші в соплі з тангенціальним підведенням дозволила визначити кількісні характеристики руху повітряно-абразивної суміші. Визначено підвищення ефективності накладання механічних коливань на елементи гідродинамічної системи під час абразивоструменевого оброблення на 30 %, що було реалізовано за рахунок зменшення площі контактування робочого двофазного потоку з його стінками. Зменшення тертя привело до покращання характеристик руху робочої суміші та зменшення енергоспоживання відповідного компресорного обладнання до 40 % за рахунок скорочення часу оброблення. У результаті підтверджено утворення більш щільного розподілу абразивних частинок у живому перерізі потоку, збільшення витрати повітряно-абразивної суміші в 2 рази та підвищення до 50 % значення контактних напружень на оброблюваній поверхні. Також аналітично встановлено залежність кута відхилення частинок дисперсної фази від частоти накладених коливань у діапазоні 3–8°, що підтверджується експериментально. Узагальнення одержаних результатів здійснено із застосуванням критеріїв подібності Re та Eu .

6. Аналітичним шляхом описано процес ерозії поверхні під час абразивоструменевого оброблення, що дозволяє визначати інтенсивність ерозії в заданій витраті піску та його фракційного складу. У результаті встановлено, що дрібніша фракція піску дозволяє обробляти більшу площу поверхні з отриманням меншої шорсткості.

7. Створено теоретичні основи оцінювання параметрів робочого сопла ежекторно-очисного обладнання. За показники ефективності сопла взято значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску, умовний коефіцієнт витрати сопла та швидкість абразивного матеріалу, що становлять $\sigma = 232\text{--}268$ Па, $\mu = 0,8\text{--}2,4$ та $C = 100\text{--}400$ м/с відповідно залежно від конструктивних особливостей сопла та режиму його роботи.

8. Розроблено нові, більш ефективні конструкції робочих сопел, які мають найбільші значення швидкості робочого потоку на виході, та пристрої для чищення внутрішніх поверхонь довгих труб, упроваджені у виробничу

практику ТОВ «НВП «Метекол», ТОВ «Боско» і навчальний процес Сумського державного університету та Військової академії м. Одеси. Установлено, що зменшення вдвічі довжини циліндричного сталевого сопла підвищує швидкість повітряно-абразивної суміші в його вихідному перерізі до 60 %. Виконана оптимізація проточної частини сопла Вентурі з використанням плану повного факторного експерименту. Установлено різницю в структурі робочого потоку в соплах із різними значеннями довжини розширювальної частини в діапазоні 0,02–0,30 м. Зі збільшенням довжини сопла збільшується значення швидкості частинок до 3,0 раза порівняно з промисловим соплом, що відповідно збільшує контактні напруження на оброблювальній поверхні. Також застосовано конструкцію перфорованої вставки сопла для зниження тертя повітряно-абразивної суміші об стінки сопла, що створило передумови для підвищення значення робочих параметрів сопла та більше ніж у 2 рази скорочення часу оброблення поверхні. Сформульовано практичні рекомендації щодо раціонального проектування соплел. Зокрема, для підвищення ефективності роботи абразивоструменевого сопла необхідно спроектувати геометрію його проточної частини так, щоб звести до мінімуму дію сил тертя, забезпечити його максимально можливу пропускну здатність за максимально можливих значень швидкості робочої суміші на виході. Вихідний струмінь повинен мати рівномірний розподіл абразивного матеріалу, заданий напрямком і кут розпилення залежно від особливостей оброблюваної поверхні. Ефективність роботи запатентованих конструкцій робочого сопла й відповідної пневмоабразивної установки підтверджено експериментально, що дозволило розширити сферу застосування розроблених науково-теоретичних і практичних підходів щодо проектування відповідного технологічного обладнання.

9. Набув подальшого розвитку метод оцінювання кількісних показників робочого сопла пневмоабразивного обладнання на основі закономірностей, одержаних експериментальним шляхом. У результаті встановлено, що всі кількісні показники ефективності сопла зростають або знижуються одночасно залежно від умов організації течії повітряно-абразивної суміші всередині сопла.

10. Отже, досягнуто основної мети дисертаційної роботи: розроблено науково-теоретичні основи робочого процесу в соплі пневмоабразивного обладнання та виконано підвищення ефективності сопла за рахунок раціонального вибору геометрії та інтенсифікації робочих процесів у повітряно-абразивній суміші, зокрема за рахунок накладання механічних коливань, що привело до розроблення нових, удосконалених конструкцій робочих соплел для пневмоабразивного обладнання, які дозволяють знизити час оброблення до 4,5 раза порівняно з аналогами, а запатентований пристрій для чищення внутрішніх поверхонь довгих труб рекомендовано для чищення виробів оборонного призначення.

Основні умовні позначення

C – інтегральний параметр; швидкість, м/с; D, d – діаметри, м; $d\delta h/dt$ – віброшвидкість, м/с; f – площа поперечного перерізу, м²; h – ширина зазору, м; h_0 – торцевий зазор, м; i – номер експерименту; уявна одиниця; K – коефіцієнт; L_2 – довжина дифузорної частини сопла, м; $L_{кр}$ – критична довжина сопла, м; min – знак мінімуму; max – знак максимуму; \dot{m} – масова витрата повітряно-абразивної суміші, кг/с; \dot{m}_i – експериментальне значення масової витрати, кг/с; \dot{m}_p – масова витрата піску, кг/с; n – загальна кількість експериментальних даних; показник степеня; p – тиск, Па; r – радіус, м; r_0 – середній радіус, м; t – час, с; u, v – компоненти швидкості газового потоку, м/с; u_p, v_p – компоненти швидкості частинок піску, м/с; V, q – об'ємна витрата, м³/с; v_r – радіальна компонента швидкості суміші, м/с; $v_{r,av}$ – середня радіальна швидкість, м/с; x, y – поздовжня й поперечна координати, м; z – кількість отворів; α – допоміжний параметр; β – показник, інерційний фактор, с⁻¹; γ – безрозмірний фактор густини; Δ – глибина ерозії, м; δ – знак варіації; ζ – коефіцієнт опору; θ – половина кута розпилення, рад; μ – динамічна в'язкість, Па · с; коефіцієнт витрат сопла; ρ, ρ_a, ρ_p – густини суміші, повітря та піску, кг/м³; σ – контактне напруження, Па; τ – стала часу, с; φ – кут напрямку потоку, рад; ω – частота, рад/с; 1, 2 – індекси вхідного й вихідного перерізів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Ванєєв С. М., Бережний О. С., Бага В. М., Родимченко Т. С., Сорокін В. А. Поелементний аналіз течії газу в проточній частині струминно-реактивної турбіни. *Компресорне та енергетичне машинобудування*. 2017. № 2 (48). С. 18–22. (Наказ МОН України № 820 від 11.07.2016 р.).

Здобувачем сформульовано загальне поставлення задачі для створення числової математичної моделі для дослідження сопла струминного апарата.

2. Vaneev S., Miroshnichenko D., Meleychuk S., Baga V. Research of multi-flow and multi-channel flow parts of the vortex expansion machines with the external peripheral channel. *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233 (1). P. 1–7. (Входить до наукометричної бази Scopus).

Здобувачем досліджено гідродинаміку потоку в периферійних каналах проточних частин апаратів.

3. Vanyeyev S. M., Meleychuk S. S., Baga V. M., Rodymchenko T. S. Investigation of the influence of gas pressure at the inlet in jet-reactive turbine on its performance indicators. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 3 (38). P. 71–82. (Входить до наукометричної бази Web of Science).

Здобувачем виконувалися числові розрахунки течії в соплах.

4. Ванєєв С. М., Мірошніченко Д. В., Журба В. О., Бага В. М., Знаменщиков Я. В., Родимченко Т. С. Стенд для дослідження розширювальних турбомашин малої потужності та агрегатів на їх основі. *Холодильна техніка та технологія*. 2019. № 55 (1). С. 15–21. (Наказ МОН України № 1301 від 15.10.2019 р.).

Здобувачем проведено серію експериментальних досліджень.

5. Vanyeyev S., Meleychuk S., Baga V., Rodymchenko T. Effect of the parameters at the inlet to the rotor of the jet-reactive turbine on its efficiency. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. F 2. P. 392–401. (Входить до наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).

Здобувачем здійснено числове моделювання процесу течії газу в каналах змінної геометрії.

6. Vaneev S., Rodymchenko T., Meleychuk S., Baga V., Bolotnikova O. Influence of the degree of off-design of the traction nozzle of a jet reaction turbine on its efficiency. *Journal of Physics*. 2021. Vol. 1741 (1). P. 1–8. (Входить до наукометричної бази Scopus).

Здобувачем виконано числові розрахунки та верифікацію результатів.

7. Ванєєв С. М., Радченко Н. В., Мелейчук С. С., Бага В. М., Родимченко Т. С. Моделювання енергетичних характеристик струминно-реактивної турбіни. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 1 (161). С. 22–27. (Наказ МОН України № 1301 від 15.10.2019 р.).

Здобувачем здійснено числове моделювання течії в соплах.

8. Husiev D., Panchenko V., Sharapov S., Kozin V., Baga V. Analysis of the possibility of using R718 for a heat pump of a heating system based on a liquid-vapor ejector. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (8). P. 39–44. (Наказ МОН України № 975 від 11.07.2019 р.; входить до наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).

Здобувачем виконувалися числові розрахунки гідродинаміки сопла.

9. Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Самардак М. П., Кононович В. М., Кушніров П. В., Клок Я. В., Бага В. М. Аналіз застосування конструкцій та області контакту штифтових конічних з'єднань конусністю 1:50. *Технічні науки та технології*. 2021. № 3 (25). С. 26–37. (Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020 р.).

Здобувачем застосовувалися конструкції конічних з'єднань у соплотримачі робочого сопла.

10. Lishchenko N., Baga V., Vanyeyev S., Mižáková J., Rodymchenko T., Pitel' J. Numerical simulation of gas flow passing through slots of various shapes in

labyrinth seals. *Energies*. 2022. Vol. 15 (9). P. 1–12. (Входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science, кuartиль Q1).

Здобувачем виконано числові та експериментальні дослідження.

11. Baha V., Mižáková J., Pavlenko I. An increase in the energy efficiency of abrasive jet equipment based on the rational choice of nozzle geometry. *Energies*. 2023. Vol. 16 (17). P. 1–16. (Входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science, кuartиль Q1).

Здобувачем виконувалися експериментальні та числові дослідження на створеному ним уніфікованому експериментальному стенді для дослідження повітряно-абразивної течії в робочих соплах пневмоабразивного обладнання.

12. Baha V., Pavlenko I., Židek K., Ciszak O. Ensuring the abrasive jet machining efficiency using a nozzle with a perforated insert. *Machines*. 2024. Vol. 12 (5). P. 1–15. (Входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science, кuartиль Q2).

Здобувачем виконувалися числові та експериментальні дослідження течії двофазного потоку в робочих соплах пневмоабразивного обладнання.

13. Бага В. М. Підвищення ефективності проточних частин соплових пристроїв пневматичних систем на основі поглибленого дослідження робочого процесу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Т. 24, № 2. С. 61–77. (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.).

14. Baha V. M., Pitel' J., Pavlenko I. V. Effect of erosion on surface roughness and hydromechanical characteristics of abrasive-jet machining. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11 (2). P. G9–G16. (Наказ МОН України № 1218 від 07.11.2018 р.; входить до наукометричних баз Scopus та Web of Science, кuartиль Q2).

Здобувачем розроблено науково-теоретичні основи оцінювання параметрів математичної моделі ерозії стінок у соплі змінного перерізу та взаємодії двофазного потоку з оброблюваною поверхнею.

15. Бага В. М. Вплив геометричних та режимних параметрів на ефективність робочого сопла пневмоабразивної ежекторної установки. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2024. Вип. 2 (56). С. 3–14. (Наказ МОН України № 491 від 27.04.2023 р.).

16. Бага В. М. Оптимізація сопла Вентурі для абразивоструминної установки. *Вісник НТУ «ХП»*. Тематичний випуск «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2024. № 5. С. 1–11. (Наказ МОН України № 1188 від 24.09.2020 р.).

17. Baha V., Pitel' J., Pavlenko I. Analytical, numerical, and experimental studies of the working process in a pneumatic abrasive installation. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (24). P. 1–14. (Входить до наукометричних баз Scopus та Web of Science, кuartиль Q2).

Здобувачем виконувалися експериментальні та числові дослідження, а також одержані аналітичні залежності для розрахунку характеристик робочого процесу в соплі.

18. Vaniciev S., Mizakova J., Smolenko D., Miroshnychenko D., Pitel J., Baha V., Meleychuk S. Electricity generation at gas distribution stations from gas surplus pressure energy. *Processes*. 2024. Vol. 12 (9). P. 1–22. (Входить до наукометричних баз Scopus та Web of Science, кuartиль Q2).

Здобувачем виконано дослідження процесу перетворення енергії надлишкового тиску газу.

19. Бага В. М., Павленко І. В. Забезпечення енергоефективності абразивоструменевої установки за рахунок оптимізації робочого сопла. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. Серія «Енергетика, енергоефективність»*. 2024. № 9 (199). С. 145–163. (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020).

Здобувачем розроблено математичну модель ерозії сопла під час абразивоструменевого оброблення та удосконалено конструкцію сопла.

20. Baha V. M., Pitel' J. Energy conversion in the working nozzle of a pneumatic abrasive-jet unit. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12 (1). P. F18–F26. (Наказ МОН України № 1218 від 07.11.2018 р.; входить до наукометричних баз Scopus та Web of Science, кuartиль Q2).

Здобувачем досліджено механізм перетворення енергії в робочому соплі пневматичного абразивоструменевого обладнання.

21. Кондусь В. Ю., Кругляк А. А., Бага В. М., Думанчук М. Ю. Дослідження робочого процесу роботи вільновихрового насоса з нециклічним робочим колесом у робочому діапазоні. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2025. Вип. 4 (58). С. 3–11. (Наказ МОН України № 491 від 27.04.2023 р.).

Здобувачем виконано серію числових розрахунків із дослідження робочого процесу.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

22. Ванєєв С. М., Родимченко Т. С., Бага В. М. Вплив швидкості на вході в ротор струминно-реактивної турбіни на коефіцієнт відновлення повного тиску в проточній частині. *International Research and Practice Conference «Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Technical Sciences»* (м. Радом, Польща, 27–28 грудня 2017 р.). С. 70–74.

Здобувачем виконані числові розрахунки сопла.

23. Бага В. М., Рапута М. В. Вплив шорсткості стінки на витратні характеристики пневмоагрегатів. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма V науково-технічної конференції (м. Суми, 17–20 квітня 2018 р.). Суми : СумДУ, 2018. С. 305.

Здобувачем встановлено вплив шорсткості внутрішніх поверхонь пневмоагрегатів на їх робочі характеристики.

24. Bondarenko G., Vanyeyev S., Baga V., Rodymchenko T., Bashlak I. Increase of efficiency of turbine setting based on study of internal flows. *Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (Sumy, 12–15.06.2018 р.). 2019. Vol. F2. P. 237–246. (Входить до наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).

Здобувачем встановлено вплив внутрішніх втрат на робочі характеристики обладнання.

25. Baga V., Lazurenko A., Davidenko O. Comparative analysis of flow in cracks and holes with an equivalent area of throat. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VII науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : СумДУ, 2020. С. 345.

Здобувачем встановлено значення коефіцієнтів витрат каналів різної геометричної форми залежно від еквівалентної площі прохідного перерізу.

26. Бага В. М., Мірошніченко М. О. Підвищення ефективності сопла піскоструменевої установки. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VII науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : СумДУ, 2020. С. 374.

Здобувачем запропоновано шляхи підвищення ефективності робочого сопла абразивоструменевого обладнання.

27. Gusak A. G., Krishtop I. V., German V. F., Baga V. M. Increase of economy of torque flow pump with high specific speed. *XV International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery HERVICON+PUMPS-2017* (Sumy, 05–08.09.2017). Vol. 233 (1). P. 1–8. (Входить до наукометричної бази Scopus).

Здобувачем виконано дослідження щодо виявлення шляхів підвищення енергоефективності гідродинамічної системи.

28. Бага В. М., Сіренко Б. І., Резнік І. В. Чисельне та експериментальне дослідження сопла абразивоструменевої установки. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VIII науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.). Суми : СумДУ, 2021. С. 290.

Здобувачем виконано серію експериментальних досліджень робочого сопла абразивоструменевого обладнання.

29. Бага В. М., Литовченко В. М. Підвищення ефективності робочого сопла ежекторно-очисної установки. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.). Суми : СумДУ, 2021. С. 383.

Здобувачем запропоновано науковий підхід щодо підвищення ефективності робочого сопла ежекторно-очисного обладнання.

30. Бага В. М., Бондаренко Г. А., Гаджієв М. В. Підвищення ефективності робочого сопла ежекторно-очисної установки. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма X Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 18–21 квітня 2023 р.). С. 280.

Здобувачем запропоновано методикку проєктування робочого сопла ежекторно-очисного обладнання.

31. Павленко І. В., Бага В. М., Яковчук В. В. Розроблення робочого сопла пневмоабразивної установки для оброблення деталей важкого машинобудування в закритих камерах. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції (м. Тернопіль, 28–30 травня 2024 р.). Краматорськ – Тернопіль : ДДМА, 2024. С. 146.

Здобувачем розроблено нову ефективну конструкцію робочого сопла пневмоабразивного обладнання.

32. Павленко І. В., Дерев'янчук А. Й., Бага В. М. Розроблення пристрою для абразивоструменевого оброблення внутрішніх поверхонь глибоких отворів. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма XI науково-технічної конференції (м. Суми, 23–26 квітня 2024 р.). Суми : СумДУ, 2024. С. 330.

Здобувачем розроблено нову конструкцію пристрою для абразивоструменевого оброблення внутрішніх поверхонь глибоких отворів.

33. Бага В. М., Гончаренко А. А., Кобзарь Ю. О., Павленко І. В. Розроблення нової конструкції робочого сопла пневмоабразивної установки.

Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма XI науково-технічної конференції (м. Суми, 23–26 квітня 2024 р.). Суми : СумДУ, 2024. С. 331.

Здобувачем розроблено нову конструкцію робочого сопла пневмоабразивного обладнання та проведено експериментальні дослідження розробленої конструкції на експериментальному стенді.

34. Бага В. М. Гідромеханічні процеси абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів. *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція Асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики (АС ПГП) (м. Київ, 19–20 грудня 2024 р.). Київ : НТУУ «КПІ», 2024. С. 61–62.*

Здобувачем проведено числові та експериментальні дослідження гідродинаміки повітряно-абразивної суміші в соплах різної геометрії.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

35. Пристрій для абразивоструменевої обробки внутрішніх поверхонь довгих труб : пат. 157768 Україна : МПК (2024.01) B24C 5/00 / І. В. Павленко, А. Й. Дерев'янчук, В. М. Бага. № u202402091 ; заявник і патентовласник СумДУ ; заявл. 19.04.2024 ; опубл. 20.11.2024, Бюл. № 47. 4 с.

Здобувачем розроблено, виготовлено та протестовано пристрій для абразивоструменевого оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб.

36. Робоче сопло для пневмоабразивної установки : пат. 158054 Україна : МПК B24C5/00 B24C5/04 / І. В. Павленко, В. М. Бага. № u202402061 ; заявник і патентовласник СумДУ ; заявл. 18.04.2024 ; опубл. 25.12.2024, Бюл. № 52. 4 с.

Здобувачем чисельно розраховано та експериментально підтверджено ефективність розробленої конструкції сопла.

37. Baha V., Pavlenko I. Experimental and numerical studies of the work process in pneumatic abrasive installations. *DataverseUA. 2025. V1. <https://doi.org/10.48788/DVUA/BRCRUW>.*

Здобувачем здійснено серію досліджень абразивоструменевих сопел різної геометрії.

АНОТАЦІЯ

Бага В. М. Наукові основи гідромеханічних процесів абразивоструменевого оброблення поверхонь. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої наукової проблеми підвищення ефективності абразивоструменевого оброблення поверхонь шляхом розроблення науково-теоретичних основ процесу витікання газодисперсної суміші з робочих сопел різної геометрії, числового моделювання гідрогазодинаміки двофазного середовища, гідродинамічних явищ з отриманням візуалізацій течії, створенню нових, більш ефективних, конструкцій робочих сопел і пристроїв для чищення внутрішнього каналу артилерійського ствола, яким немає аналогів у світі, аналізу впливу геометричних і режимних параметрів сопла на ефективність роботи пневмоабразивних установок, створенню науково-теоретичних основ дії супутніх процесів тертя, втрат енергії та впливу зношення сопла.

Уперше теоретично обґрунтовано підвищення ефективності робочого сопла пневмоабразивної установки за рахунок підвищення значень газодинамічних параметрів уздовж сопла; створено науково-теоретичні основи дослідження взаємодії абразивних елементів із газорідним потоком, що дало змогу визначати робочі параметри повітряно-абразивної суміші в абразивоструменевому соплі; створено науково-теоретичні основи дослідження процесу витікання повітряно-абразивної суміші з робочого сопла пневмоабразивних установок; створено наукові основи теорії витікання двофазного потоку для дослідження процесів оброблення матеріалу пневмоабразивним обладнанням.

Створено науково-теоретичні основи робочого процесу в робочому перфорованому соплі пневмоабразивної установки з урахуванням гідродинамічних сил і за умов накладання механічних коливань, на основі яких визначено коефіцієнт витрат робочого сопла та досліджено вплив геометричних і режимних параметрів на ефективність оброблення.

Набули подальшого розвитку математичні моделі процесів течії робочого потоку в соплі Вентурі та застосування повітряного прошарку всередині сопла для зниження тертя дисперсної фази об стінки робочого сопла пневмоабразивної ежекторної установки. Визначено теоретичні основи оцінювання параметрів процесу витікання абразивоповітряних сумішей за умови накладання коливань зі змінними амплітудою та частотою.

На основі одержаних закономірностей розширено методи досліджень процесів витікання через сопла як елементи гідравлічних пристроїв, ерозію оброблюваного матеріалу, механізм взаємодії абразивних частинок із робочим

соплом та оброблюваною поверхнею. Розроблено пристрій для оброблення внутрішніх поверхонь довгих труб.

Загалом дисертаційна робота спрямована на підвищення ефективності роботи абразивоструменевого сопла, енергоефективності абразивоструменевого обладнання, розроблення нових, більш ефективних його конструкцій і методів визначення робочих характеристик сопла. Одержані результати важливі для оборонної галузі, зокрема для виконання відновлювальних робіт пошкоджених споруд і техніки під час пожеж у військовий період, а також чищення внутрішніх каналів нарізних артилерійських знарядь.

Ключові слова: гідродинаміка, двофазний потік, пневмоабразивне обладнання, робоче сопло, амплітуда та частота коливань, числове моделювання, енергоефективність, гідравлічний пристрій, візуалізація течії, гідродинамічні явища.

ABSTRACT

Baga V. M. Scientific fundamentals of hydromechanical processes for abrasive-jet machining of surfaces. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences for specialty 05.05.17 – Hydraulic Machines and Hydropneumatic Units. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Specialized Academic Council D 64.050.11.

The dissertation is dedicated to solving an important scientific problem of increasing the efficiency of abrasive blasting of surfaces by developing scientific and theoretical foundations of the process of gas-dispersed mixture outflow from working nozzles of various geometries, numerical modeling of hydro-gas dynamics of a two-phase medium, hydrodynamic phenomena with obtaining flow visualizations, creating new, more effective designs of working nozzles and devices for cleaning the internal channel of an artillery barrel, which have no analogues in the world, analyzing the influence of geometric and operating parameters of the nozzle on the efficiency of the operation of pneumatic abrasive installations, creating scientific and theoretical foundations of the action of accompanying friction processes, energy losses and the influence of nozzle wear.

For the first time, the increase in efficiency is theoretically substantiated For the first time, theoretically substantiated the increase in efficiency of the working nozzle of the air-abrasive installation by increasing the values of gas-dynamic parameters along the nozzle; created scientific and theoretical foundations for the study of the interaction of abrasive elements with the gas-liquid flow, which allowed to determine the operating parameters of the air-abrasive mixture in the abrasive jet nozzle; created scientific and theoretical foundations for the study of the process of leakage of air-abrasive mixture from the working nozzle of air-abrasive installations; created scientific foundations of the theory of leakage.

The scientific and theoretical foundations of the working process in the working perforated nozzle of the air-abrasive machine were created, taking into account

hydrodynamic forces and under conditions of imposed mechanical vibrations, based on which the consumption coefficient of the working nozzle of the machine was determined, and the influence of geometric and operating parameters on the processing efficiency was investigated.

The mathematical models of the processes of the working stream flow in the Venturi nozzle and the use of an air gap inside the nozzle to reduce the friction of the dispersed phase against the walls of the working nozzle of the pneumatic abrasive ejector unit were further developed. The theoretical basis for estimating the parameters of the process of flowing abrasive-air mixtures has been created with variable amplitude and frequency.

Based on the obtained regularities, the methods of studying the processes of nozzle flow, erosion of the processed material, and the mechanism of interaction of abrasive particles with the working nozzle, as hydraulic devices, and the surface to be treated were extended. A device for processing the internal surfaces of long pipes was developed.

Generally, the DSc. research is aimed at improving the efficiency of the abrasive blasting nozzle, energy efficiency of abrasive blasting equipment, developing new, more efficient designs and calculation methods for determining the performance characteristics of the nozzle. The results obtained are important for the defense industry, including for the restoration of damaged structures and equipment during fires in wartime, as well as for cleaning the internal channels of rifled artillery.

Key words: hydrodynamics, two-phase flow, pneumatic abrasive hydraulic equipment, working nozzle, amplitude and frequency of oscillation, numerical modeling, energy efficiency, hydraulic device, visualization of equipment, hydrodynamic phenomena.



Підписано до друку 30.04.2025.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007
Свідоцтво про внесення суб'єкта господарювання до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 8193 від 15.10.2024.