

**Бага В.М.**, к.т.н., доцент. 066-744-06-08, [v.baga@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:v.baga@kttf.sumdu.edu.ua) (0000-0002-0131-631X)

**Павленко І.В.**, д.т.н., проф., [i.pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua](mailto:i.pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua) (0000-0002-6136-1040)

*Сумський державний університет*

*вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, 40007*

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АБРАЗИВОСТРУМЕНЕВОЇ УСТАНОВКИ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧОГО СОПЛА

***Анотація.** В даній статті розглянуто шляхи підвищення енергоефективності абразивоструменевої установки за рахунок розробки більш досконалої конструкції робочого сопла, застосування якого призводить не тільки до покращення робочих характеристик установки, а й до скорочення споживання електроенергії повітряним компресором до 30 %. Абразивоструменева установка набула широкого застосування в багатьох техпроцесах з обробки поверхонь матеріалів перед нанесенням покриттів, при виконанні відновлювальних робіт, чистках важкодоступних місць і т.д. Таким чином вживання заходів щодо підвищення ефективності абразивоструменевої установки є актуальним. Абразивоструменева установка представляє собою ємність з абразивним матеріалом, яка через дозуючий кран гумовий рукав з'єднується з джерелом стисненого повітря та з абразивоструменевим соплом. Від конструкції самого сопла найбільшим чином залежить ефективність роботи всієї установки. Показниками ефективності робочого сопла визначені наступні параметри: швидкість абразиво-повітряної суміші на виході з сопла, сила реакції струї, контактні напруження на оброблюваній поверхні, що виникають від удару піску в процесі її обробки, коефіцієнт витрати сопла. Для підвищення ефективності робочого сопла та абразивоструменної установки цілому, необхідно підвищити значення вказаних показників, що є можливим за рахунок виконання оптимізації геометрії сопла.*

*За результатами виконаних досліджень обґрунтована можливість зниження енергоспоживання компресора, стиснене повітря якого використовується в якості несучого потоку для абразивоструменевої установки за рахунок оптимізації робочого сопла. Запропоновано показники ефективності робочого сопла абразивоструменевої установки. Створено теоретичні основи оцінювання параметрів робочого сопла. Запропоновано нові, більш ефективні конструкції робочих сопел та розроблено пристрій для чистки внутрішніх поверхонь довгих труб. Розроблено математичну модель ерозії, що виникає під час абразивоструменевої обробки. Вирішені завдання щодо зниження споживання електроенергії та абразивного матеріалу абразивоструменевою установкою до 30 % за рахунок розробки більш досконалої конструкції робочого сопла.*

***Ключові слова:** електричний двигун, енергоефективність установки, робочі характеристики, робоче сопло, коефіцієнт витрати.*

**Baga V.** Ph.D., associate professor, 066-744-06-08, [v.baga@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:v.baga@kttf.sumdu.edu.ua), (0000-0002-0131-631X)

**Pavlenko I.** D.Sc., prof., [i.pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua](mailto:i.pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua) (0000-0002-6136-1040)

*Sumy State University*

*116, Kharkivska St., Sumy, Ukraine, 40007*

## ENSURING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ABRASIVE JET INSTALLATION DUE TO THE OPTIMIZATION OF THE WORKING NOZZLE

**Abstract.** *This article considers ways to improve the energy efficiency of an abrasive blasting machine by developing a more advanced design of the working nozzle, the use of which leads not only to an improvement in the performance of the machine, but also to a reduction in electricity consumption by the air compressor by up to 30 %. The abrasive blasting machine is widely used in many technical processes for surface treatment of materials before coating, during restoration work, cleaning hard-to-reach places, etc. Thus, taking measures to improve the efficiency of an abrasive blasting machine is relevant. An abrasive blasting machine is a container with an abrasive material that is connected to a compressed air source and an abrasive blasting nozzle through a rubber hose via a dosing valve. The design of the nozzle itself has the greatest impact on the efficiency of the entire system. The following parameters are defined as indicators of the efficiency of the working nozzle: the speed of the abrasive-air mixture at the nozzle outlet, the reaction force of the jet, the contact stresses on the treated surface arising from the impact of sand during its processing, and the nozzle flow rate. To increase the efficiency of the working nozzle and the abrasive blasting machine as a whole, it is necessary to increase the values of these factors, which is possible by optimizing the nozzle geometry.*

*Based on the results of the performed studies, the possibility of reducing the energy consumption of a compressor, the compressed air of which is used as a carrier stream for an abrasive blasting machine, by optimizing the working nozzle is substantiated. The efficiency indicators of the working nozzle of an abrasive blasting unit are proposed. The theoretical basis for estimating the parameters of the working nozzle is created. New, more efficient designs of working nozzles are proposed and a device for cleaning the internal surfaces of long pipes is developed. A mathematical model of erosion occurring during abrasive blasting was developed. The tasks of reducing the consumption of electricity and abrasive material by an abrasive blasting unit by up to 30 % due to the development of a more perfect design of the working nozzle were solved.*

**Keywords:** *electric motor, energy efficiency of the installation, performance characteristics, working nozzle, flow coefficient.*

**Постановка проблеми.** Сучасні вимоги до технологічних процесів з нанесення захисних покриттів різних матеріалів потребують дуже якісного та відносно недорогого способу очищення від корозії, шлаку, масляної плівки фарби та інших забруднень. Абразивоструменева установка є невід'ємною складовою при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт. Якщо при обробці металевих поверхонь піскоструминну обробку можна замінити гідроструминною, то при обробці дерев'яних поверхонь дозволяється використовувати лише повітряно-абразивну суміш. Слід зауважити, що утримання піскоструминних закритих камер потребує тих же підходів щодо удосконалення конструкції робочого сопла, що й при напірній схемі.

Основним елементом який визначає енергоефективність абразивоструминної установки є робоче сопло. Саме від робочого сопла залежать

технологічні параметри абразивоструменевого оброблення поверхонь матеріалів, витрата дорогих витратних матеріалів, таких як абразивний матеріал та стиснене повітря. В процесі несуттєвого зносу робочого сопла, відбувається суттєве збільшення значень витрат витратних матеріалів та зниження швидкості суміші на виході з сопла, а значить й зниження ефективності установки в цілому. Електрична енергія при абразивоструменевій обробці перетворюється в потенційну енергію робочого потоку, яка в свою чергу, перетворюється в кінетичну енергію витікаючої повітряно-абразивної суміші.

Це перетворення відбувається у пневмоагретах, конструкція яких має робочі сопла та принцип їх роботи в більшості випадків впливає на ефективність електромеханічної системи перетворення енергії в цілому [1, 2].

Розробка сучасних енергоефективних абразивоструменевих сопел є основним напрямом роботи який визначив напрям подальших досліджень що проведено у роботі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглянемо аналіз останніх досліджень і публікацій по темі витікання робочого потоку через сопла різних геометричних форм. У роботах [3-5] розглядаються загальні підходи до визначення закономірностей витікання робочого середовища через елементи проточних частин різних технічних систем. Витікання через звужувальні канали, характеризується значенням коефіцієнта витрати досліджуваної щілини, каналу чи сопла.

Показником ефективності робочого сопла ежекторно-очисної установки є значення швидкості абразиво-повітряної суміші на виході з сопла. Ця швидкість залежить від геометричних та режимних параметрів самого сопла. Геометрія сопла безпосередньо впливає на розподіл швидкості, тиску, температури та щільності робочого потоку. Внутрішні втрати сопла пов'язані з підвищеним тертям об його стінки завдяки абразивним частинкам. Таким чином підвищити ефективність сопла можна за рахунок використання оптимальної геометрії його проточної частини та зменшенням внутрішнього тертя. Для досягнення максимального ефекту треба застосувати обидва шляхи одночасно. Покращення

продуктивності завдяки оптимальному профілю потоку є значним [6-7]. В роботі [8] досліджувалася ерозія сопла в свердловині. Це явище подібне зносу абразивоструменевого сопла в процесі його роботи. Встановлено що розмір частинок і масова швидкість потоку є основними факторами, що впливають на ефект ерозії сопла, також положення установки насадки впливає на ефективність ерозії сопла. В роботі [9] Було виявлено, що наявність піщинок в соплі сприяє розвитку кавітаційного потоку, а діапазон сприяння концентрації стає меншим із збільшенням середнього діаметра. Для розрахунків запропоновано використовувати формулу А. Стодола для визначення витрати через отвір з гострою кромкою, доповнену експериментальними коефіцієнтами що враховують особливості течії абразивного матеріалу[10].

$$m = \mu_p \cdot k \cdot f \sqrt{\frac{1 + (p_2 / p_1)}{z}} \cdot \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \rho_1}, \quad (1)$$

де  $\mu_p$  – коефіцієнт витрати сопла;

Методи розрахунку і проектування елементів з малими прохідними перетинами такі як циліндричні сопла, конічні сопла, отвори з гострими кромками і т.д. базуються на експериментальних даних, узагальнених в тій чи іншій мірі. Наприклад, для розрахунку лабіринтного ущільнення, його представляють як ряд послідовно встановлених отворів з гострими кромками  $z$  та вводять в розрахунок умовний коефіцієнт витрати  $\mu$  який враховує всі спрощення та невідповідності. По цьому принципу ми розраховуємо витратні характеристики через абразивоструменево сопло.

**Постановка завдання.** Метою роботи є зниження споживання електроенергії абразивоструминної установки. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити дві основні задачі:

- розробити математичну модель процесу ерозії поверхні під час пневмоабразивного оброблення;
- визначити показники ефективності абразивоструменевої установки;
- розробити нову, більш ефективну конструкцію робочого сопла.

Ця робота спрямована на розробку загальних підходів до підвищення енергоефективності установок, що використовують соплові апарати.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглядається плоска течія повітряно-абразивної суміші з частинками середнього діаметра  $d$ .

Взаємодія струменя з металевою поверхнею під кутом  $\varphi$  призводить до ерозії поверхні глибиною  $\Delta$  (рисунок 1). При цьому площа сегмента становить:

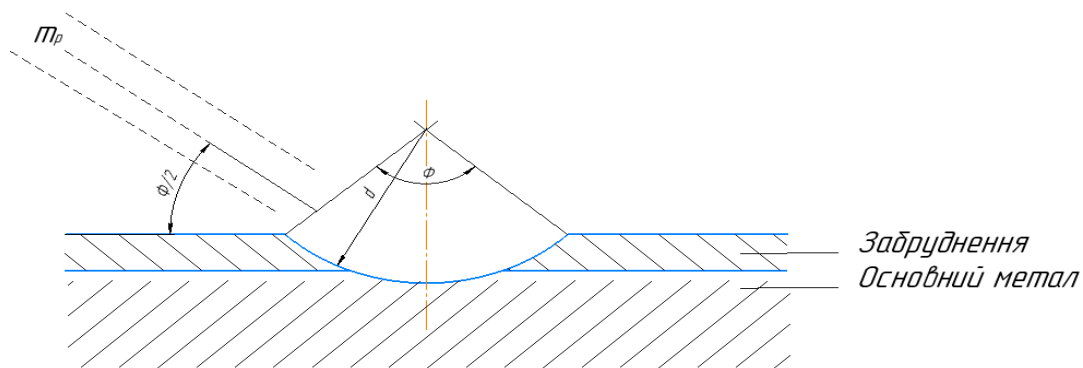


Рисунок 1 – Розрахункова схема для опису математичної моделі ерозії матеріалу

$$S = \frac{1}{8} \cdot d^2 \cdot (\varphi - \sin(\varphi)) \tag{2}$$

Маса цієї частини товщиною  $b$  дорівнює:

$$m_0 = \rho \cdot S \cdot b \tag{3}$$

де  $\rho$  – густина металу,  $\text{кг/м}^3$ .

З урахуванням геометричного співвідношення:

$$\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 1 - 2 \cdot \frac{\Delta}{d} \tag{4}$$

можна записати тригонометричне співвідношення:

$$\sin(\varphi) = 2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sqrt{1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2} \tag{5}$$

у такому вигляді:

$$\sin(\varphi) = 4 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\Delta}{d}\right) \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \cdot \frac{\Delta}{d}} \quad (6)$$

Ураховуючи малість глибини ерозії  $\Delta$  порівняно з розмірами піску ( $\Delta \ll d$ ) та беручи до уваги розкладання функції (3.62) у ряд Маклорена відносно кута  $\varphi$  з утриманням членів третього порядку малості:

$$\sin(\varphi) = \frac{\varphi}{1!} - \frac{\varphi^3}{3!} + O(\varphi^3) \quad (7)$$

можна переписати формулу (3.58) у такому вигляді:

$$s = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\Delta}{d}\right)^3 \cdot \left[\left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \cdot \frac{\Delta}{d}\right]^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

Після повторного розкладання у ряд Маклорена відносно безрозмірного відношення  $\Delta/d$ , утримуючи члени першого порядку малості

$$s = \frac{4}{3} \cdot \Delta^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{d} + O\left[\left(\frac{\Delta}{d}\right)^2\right] \quad (9)$$

Таким чином, вираз (3.59) набуває такого вигляду:

$$m_0 = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot b \cdot \Delta^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{d} \quad (10)$$

звідки знаходимо вираз для сегмента  $\Delta$ :

$$\Delta = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{m_0}{\rho \cdot b \cdot \sqrt{d}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

Диференціюючи ліву і праву частини цього рівняння за часом  $t$ :

$$\frac{d}{dt} \Delta = \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{d}{dt} m_0}{\left(\frac{4}{3} \cdot \rho \cdot b \cdot \sqrt{m_0 \cdot d}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (12)$$

та з урахуванням виразу (3.66) одержимо:

$$\frac{d}{dt}\Delta = \frac{\frac{d}{dt}m_0}{2 \cdot \rho \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot \Delta}} \quad (13)$$

Вводячи швидкість ерозії як зміну з часом товщини  $\Delta$ :

$$v = \frac{d}{dt}\Delta \quad (14)$$

та за припущення, що інтенсивність ерозії (секундна зміна маси  $m_0$ ) пропорційна масовій витраті піску  $m_p$ :

$$\frac{d}{dt}m_0 = K \cdot m_p \quad (15)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, одержимо наступну залежність швидкості ерозії від масової витрати піску:

$$v = \frac{K \cdot m_p}{2 \cdot \rho \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot \Delta}} \quad (16)$$

Екстраполюючи це співвідношення на частинки піску, форма яких наближена до сферичної форми, проте із середнім діаметром, що дорівнює діаметру Саутера, одержимо узагальнену залежність для швидкості ерозії:

$$v = \frac{K_e}{\sqrt{\Delta}} \cdot \frac{m_p}{\rho \cdot d_s^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

де  $K_e$  – безрозмірний параметр що враховує як форму частинок, так і пропорційність інтенсивності ерозії масовій витраті піску. Оцінювання цього коефіцієнта здійснюється за експериментальними даними шляхом мінімізації наступного функціоналу:

$$R = \sum_{i=1}^N \left( \frac{K_e}{\sqrt{\Delta_i}} \cdot \frac{m_p}{\rho \cdot d_s^{\frac{3}{2}}} - v_i \right)^2 \quad (18)$$

де  $N$  – кількість експериментальних даних;  $i$  – номер експериментальної точки ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Для усунення сингулярності обчислень, необхідно брати експериментальні точки для ненульового моменту часу.

Умова мінімізації цього функціоналу еквівалентна умові рівності нулю його похідної:

$$\frac{d}{dK_e} R = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \left( K_e \cdot \frac{\Lambda}{\sqrt{\Delta_i}} - v_i \right) \cdot \frac{\Lambda}{\sqrt{\Delta_i}} \right] = 0, \quad (19)$$

де для зручності введений параметр  $\Lambda$ , який не залежить від номера експеримента та має розмірність  $m^{(3/2)}/s$ :

$$\Lambda = \frac{m_p}{\rho \cdot d_s^{\frac{3}{2}}} \quad (20)$$

Цей параметр також дозволяє спростити вираз (19):

$$v(\Delta) = \frac{K_e \cdot \Lambda}{\sqrt{\Delta}} \quad (21)$$

Остаточно, умова (3.77) дозволяє встановити аналітичний вираз для визначення шуканого параметра:

$$K_e = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{\sqrt{\Delta_i}}}{\sum_{i=1}^N (\Delta_i)^{-1}} \quad (22)$$

Розробка пристрою для обробки внутрішніх поверхонь довгих труб

Для якісної обробки внутрішніх поверхонь труб абразиво-струминною установкою розроблено спеціальний пристрій, який переміщають вздовж оброблюваної поверхні труби. Складність обробки внутрішніх поверхонь довгих



труб полягає у втраті сили удару струї по довжині її прольоту та неможливістю направлення абразиво-повітряного струменя на внутрішню стінку труби на значній відстані від сопла. При обробці внутрішніх поверхонь труб незначної довжини виникає складність рівномірної її обробки, що особливо відчутно при наявності значних забруднень.

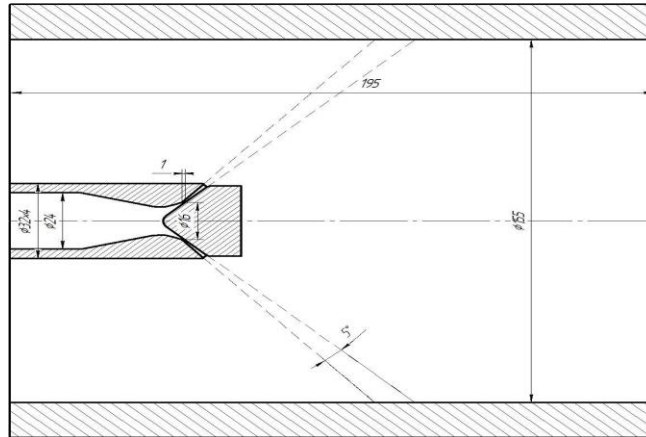
Для подолання вищенаведених складнощів було розроблено чотири конструкції пристрою для обробки внутрішніх поверхонь довгих труб. Дослідження виконувались з використанням програмного комплексу ANSYS з перевіркою на експериментальному стенді. Моделювання виконувалося з імітацією оброблюваної поверхні труби, з внутрішнім діаметром  $d=155$  мм, що імітує діаметр ствола артилерійського озброєння. Розроблені пристрої для чистки стволів артилерійського озброєння є актуальні, оскільки під час пострілів в нарізних канавках стволів накопичуються мідні відкладення та продукти згорання порохових зарядів. В результаті чого погіршуються балістичні характеристики польоту снаряду. В процесі експлуатації артилерійського озброєння внутрішні нарізні канавки ствола можуть повністю заростати брудом, який з певною періодичністю треба видаляти, що є досить працездатним процесом, який потребує значну кількість часу. Тому розробка спеціальних пристроїв для чистки артилерійських стволів є актуальною. Пропоновані конструкції пристроїв для чистки внутрішніх поверхонь труб є гарною альтернативою існуючим ручним знаряддям, та можуть в якості джерела стисненого повітря використовувати повітря, яке знаходиться в ресиверах важкого автотранспорту для живлення пневмосистем автомобіля. Для ефективною роботи варто заживитися стисненим повітрям від декількох автомобілів.

Параметри піску які задавались при моделюванні:

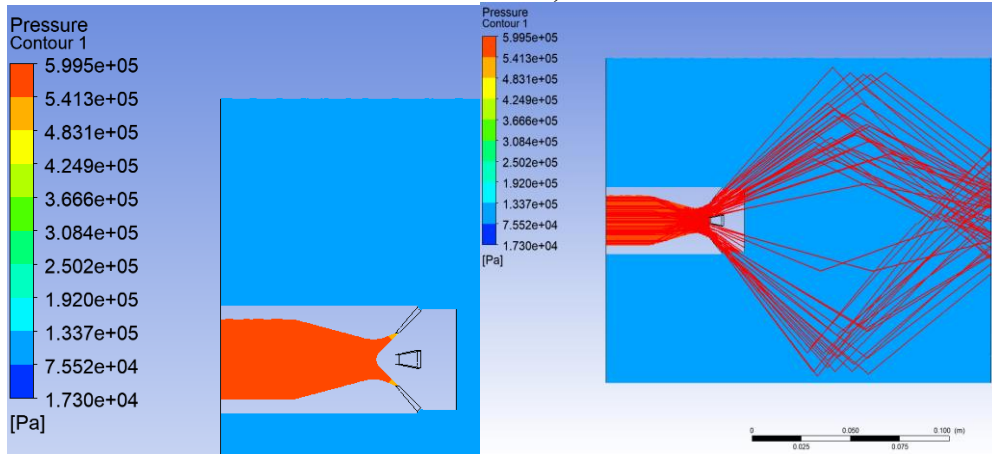
- $D_{part} = 0.2$  мм – діаметри піщинок (частинок);
- $m_{part} = 0.03$  кг/с – масова витрата піску (частинок);
- $P_{абс} = 6$  атм.

Досліджуваний пристрій, що зображено на рис. 2, а) має форму кільцевого сопла на якому критичний перетин знаходиться на діаметрі  $d = 16$  мм. На

візуалізаціях червоним кольором зображена швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, а синім – швидкість струйки току газу (повітря).



а)

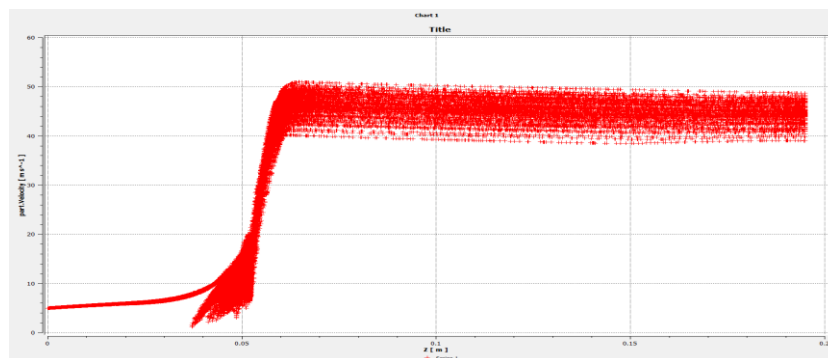


б)

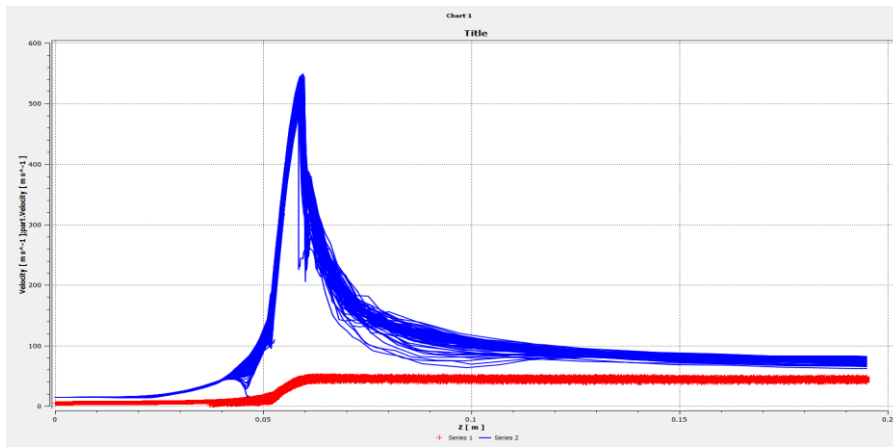
в)

Рисунок 3 – Дослідження пристрою для чистки труб:

а) схема; б) зміна тиску по довжині проточної частини; в) траєкторії руху частинок піску.



а)

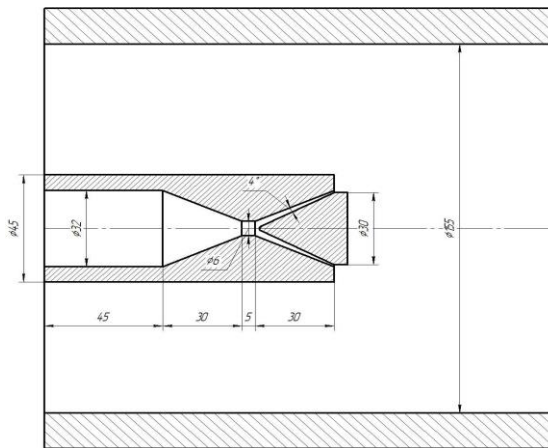


б)

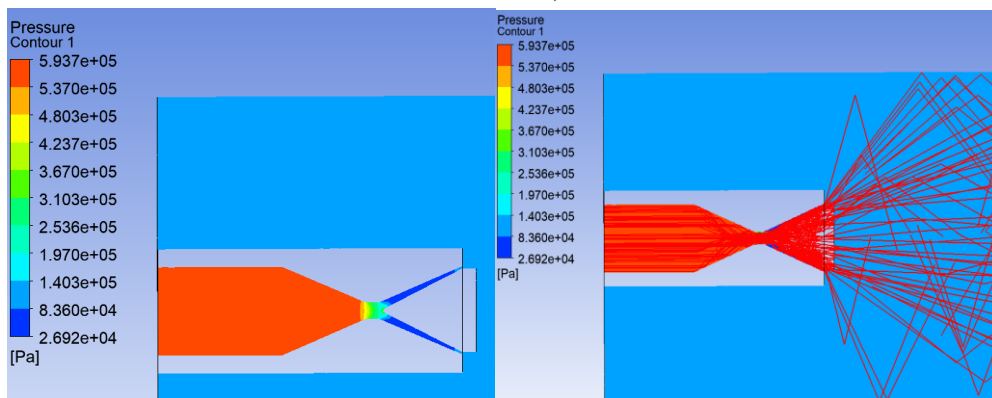
Рисунок 4 – Зміна швидкостей суцільної (а) та несучої фаз (б) на траекторіях їх руху:

- а) зміна швидкості частинок піску;
- б) зміна швидкості суміші по довжині сопла.

Друга досліджувана конструкція сопла звужується у напрямку руху до вихідного перетину, але має менше значення вихідної площі соплового апарату.



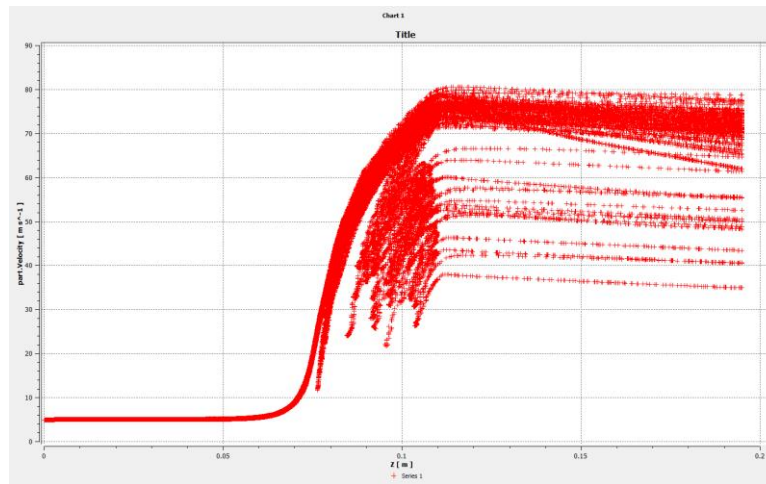
а)



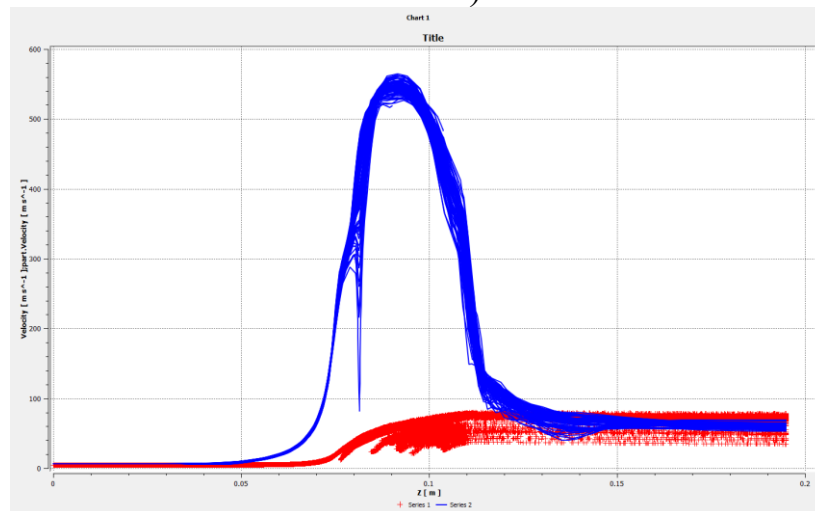
б)

в)

Рисунок 5 – Дослідження пристрою для чистки труб:  
а) схема; б) зміна тиску по довжині проточної частини; в) траєкторії руху частинок піску.



а)



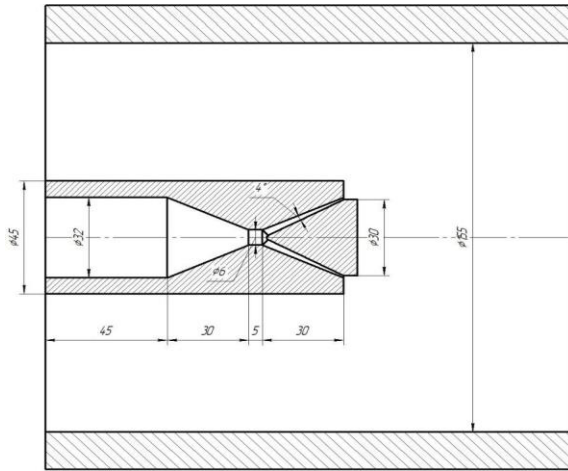
б)

Рисунок 6 – Зміна швидкостей суцільної (а) та несучої фаз (б) на траекторіях їх руху:

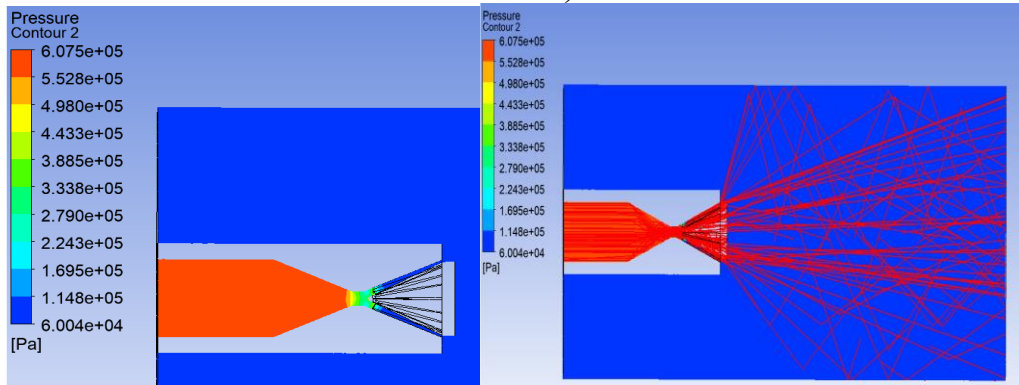
- а) зміна швидкості частинок піску;
- б) зміна швидкості суміші по довжині сопла.

Розміщення перегородок в середині сопла, за допомогою яких відбувається зменшення вихідної площі на виході позитивного ефекту по швидкості піску неотримали, за рахунок появи додаткового гідравлічного опору, що погоджується з [376–391].

Третя досліджувана конструкція сопла має розпірні перегородки в середині проточної частини, що необхідно для забезпечення міцності конструкції, та позитивно впливає на роботу сопла за рахунок зменшення площі сопла.



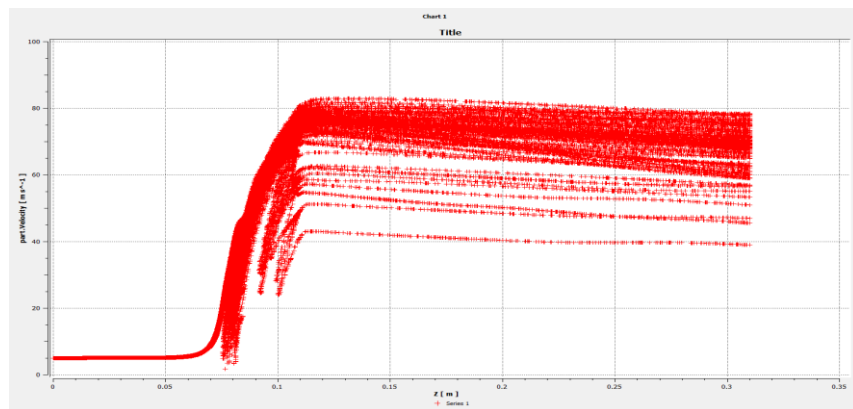
а)



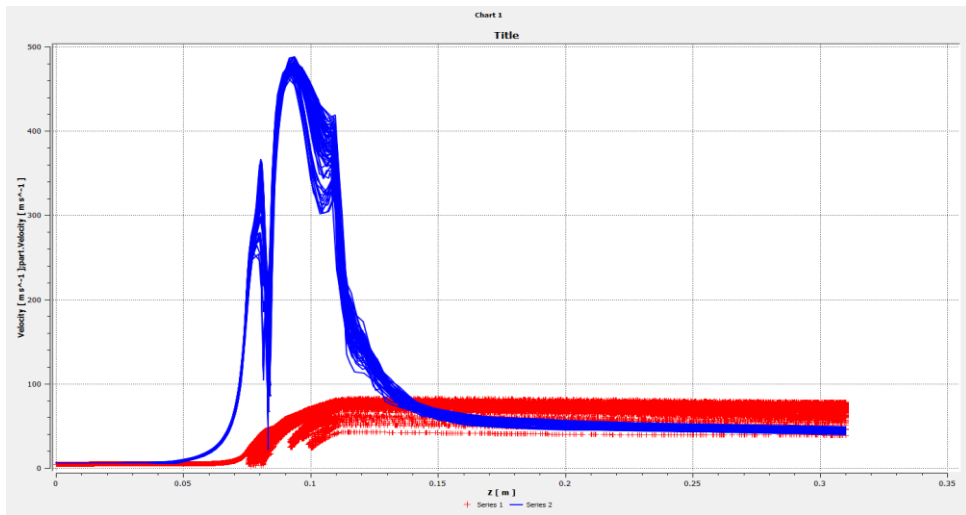
б)

в)

Рисунок 7 – Дослідження пристрою для чистки труб:  
а) схема; б) зміна тиску по довжині проточної частини; в) траєкторії руху частинок піску.



а)

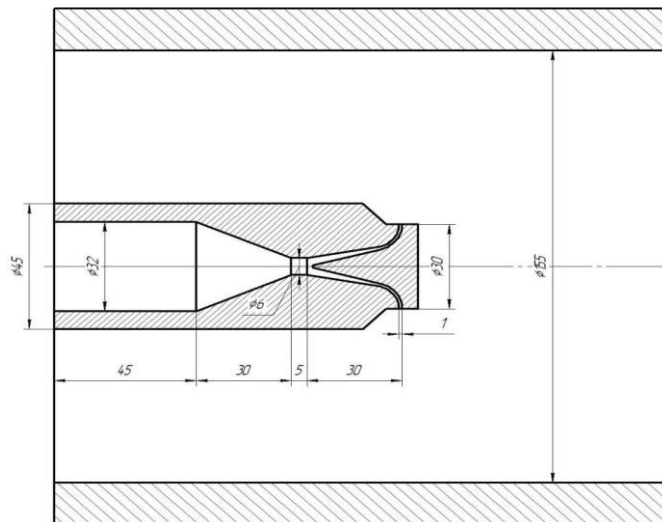


б)

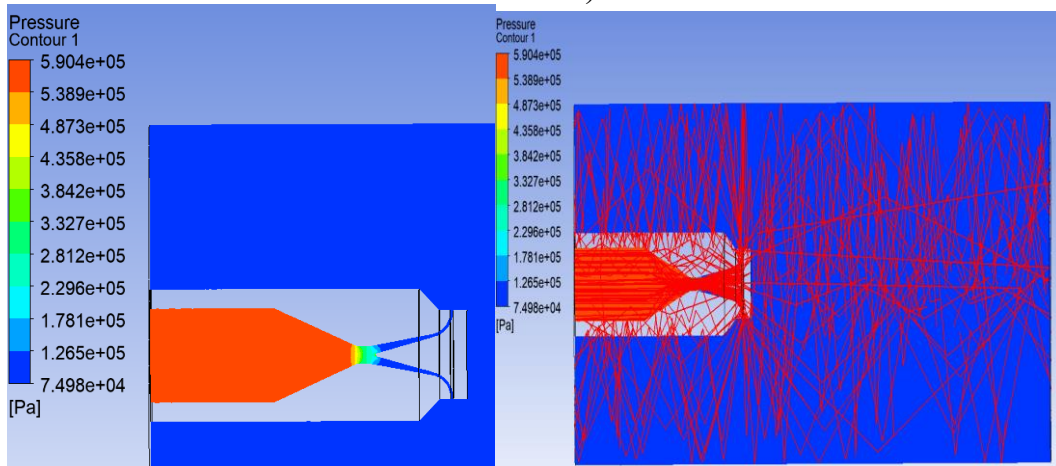
Рисунок 8 – Зміна швидкостей суцільної (а) та несучої фаз (б) на траекторіях їх руху:

- а) зміна швидкості частинок піску;
- б) зміна швидкості суміші по довжині сопла.

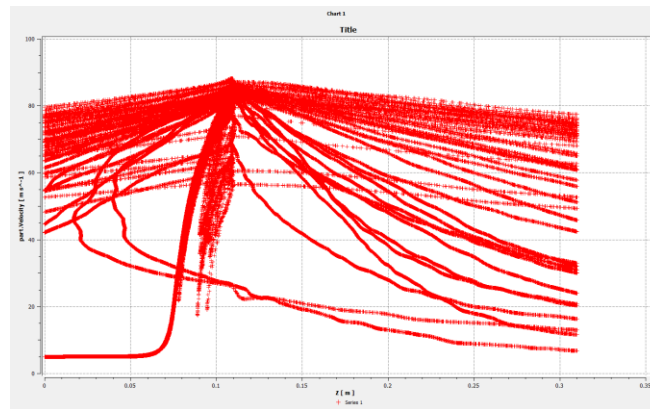
Четверта досліджувана конструкція має тангенційну організацію підводки повітряно-абразивної суміші до стінок труби.



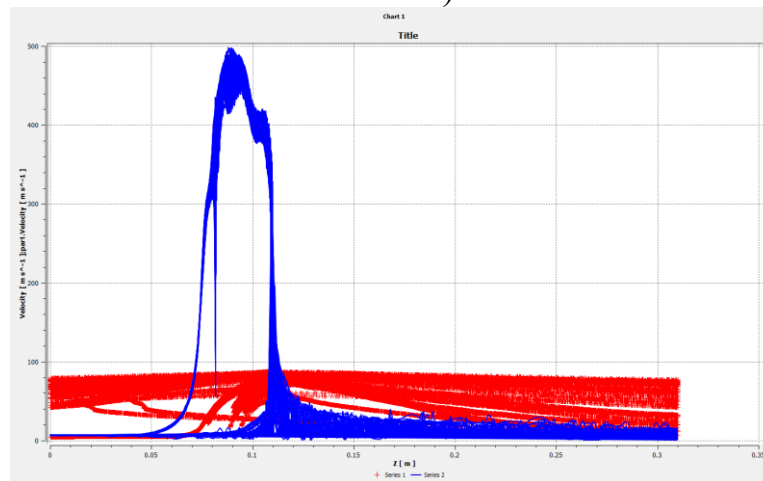
а)



б) в)  
 Рисунок 9 – Дослідження пристрою для чистки труб:  
 а) схема; б) зміна тиску по довжині проточної частини; в) траєкторії руху частинок піску.



а)



б)

Рисунок 10 – Зміна швидкостей суцільної (а) та несучої фаз (б) на траєкторіях їх руху:

- а) зміна швидкості частинок піску;
- б) зміна швидкості суміші по довжині сопла.

З наведених результатів на рисунках 6-10 видно, що швидкість частинок піску менша за швидкість несучої фази, що погоджується з результатами наведеними в 5 розділі для звичайних конструкцій робочих сопел.

Може бути безліч варіантів з різними довжинами та кутами виходу струї. Необхідно виконувати спеціальні оптимізаційні дослідження для розробки пристрою для чистки внутрішніх поверхонь труб, що мають індивідуальні значення діаметрів.

Для великих значень внутрішніх діаметрів оброблюваних труб, необхідно використовувати пристрій з подачею абразиво-повітряного струменя під прямим кутом до поверхні.

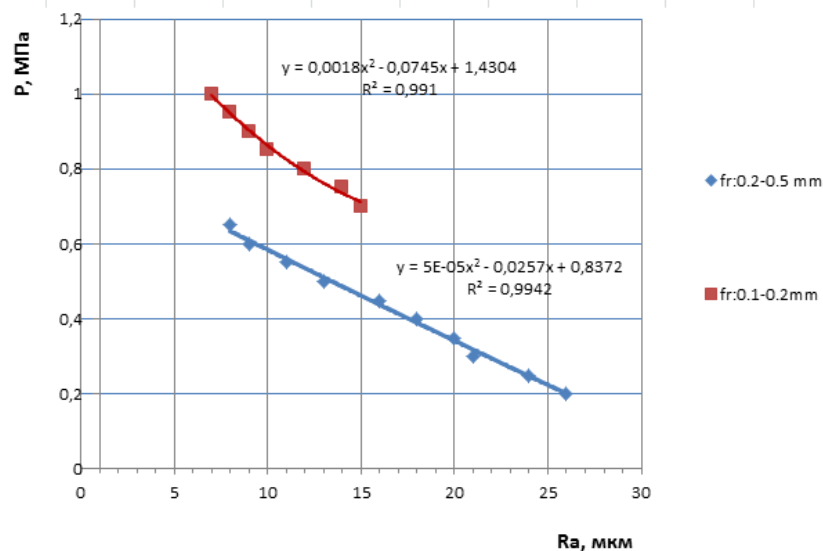
Результати чисельного моделювання двофазного середовища дали змогу отримати уявлення про формування траєкторії руху абразивних частинок в обраній постановці задачі, що погоджується з роботами [1, 5, 8].

Наведені в статті конструкції робочих сопел можуть бути застосованими на практиці, оскільки ефективність їх роботи підтверджена експериментально.

Розроблені пристрої для чистки внутрішніх поверхонь довгих труб рекомендовано застосовувати для чистки артилерійських нарізних та гладких стволів.

Отримані візуалізації траєкторій руху абразивних частинок в артилерійському стволі діаметром  $d=155$  мм.

Нижче наведено результати експериментальних досліджень поверхонь матеріалу з початковою шорсткістю 50 мкм, які оброблялися абразивом зернистістю від 0,2 до 0,5 мм та 35 мкм які оброблялися абразивом зернистістю від 0,1 до 0,2 мкм.



Рисунк 11 – Результати експериментального дослідження по визначенню шорсткості поверхні

На рисунку 11 зображено дві криві для різного фракційного складу піску. Отримана залежність впливу робочого тиску на шорсткість обробленої поверхні.



З графіків видно, що застосування мілкішої фракції піску дає можливість отримати більш якісну поверхню, що пояснюється більшою площею контакту мілкішого абразиву з оброблюваною поверхнею.

З отриманих результатів очевидний суттєвий вплив шорсткості поверхні на характеристики сопла. Призначенням сопла пневмо-абразивної установки є розгін повітряно-абразивної суміші до максимально можливої швидкості [5]. Обмеження цієї швидкості зумовлені індивідуальними особливостями окремого сопла. Кожне сопло має свою пропускну здатність, чим зумовлене індивідуальне значення коефіцієнту витрати. Чим вище значення коефіцієнта витрати сопла тим вище значення масової витрати повітряно-абразивної суміші. Ідеальне сопло – це таке сопло, що має максимально можливу витрату повітряно-абразивної суміші з максимально можливою швидкістю. Є ряд геометричних та режимних чинників, які призводять до зниження значення швидкості на зрізі сопла, основними з яких є: недостатній перепад тиску до та після сопла, зайва довжина сопла, яка за рахунок тертя гальмує робочу суміш, шорсткість та знос внутрішньої поверхні сопла, нестаціонарність подачі абразивного матеріалу та ін. Більш доступним та дієвим способом боротьби з гідравлічним спротивом сопла є вкорочення його довжини, що підтверджено нашими дослідженнями [10]. Слід зауважити, що скорочення довжини сопла зі змінним перетином може призвести до втрати його газодинамічних переваг перед більш простими конструкціями, тому наші подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію проточної частини такого сопла. Також існує необхідність у виборі більш стійкого покриття, яке було б здатним більш тривалий час не піддаватися зносу.

### **Висновки.**

1. Розроблена математична модель процесу ерозії поверхні під час пневмоабразивного оброблення яка дозволяє визначати інтенсивність ерозії в заданій витраті  $m$  піску та його фракційного складу.
2. Створено теоретичні основи оцінювання параметрів робочого сопла ежекторно очисної установки. А саме, в якості показників ефективності сопла

прийняті значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску, коефіцієнт витрати сопла та швидкість абразивного матеріалу.

3. Розроблено нові більш ефективні конструкції робочих сопел та пристрої для чистки внутрішніх поверхонь довгих труб.

4. Отримані візуалізації траєкторій руху абразивних частинок в артилерійському стволі діаметром  $d=155$  мм.

5. Запропоновані конструкції робочих сопел сприяють більш ефективній обробці внутрішніх поверхонь труб, що вдвічі зменшує час роботи установки.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Петренко О. М. Наукові основи вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.22.09 / Олександр Миколайович Петренко; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2018. – 34 с. – URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3d0d605c-d8bd-4c8c-bb08-5a5083aca885/content> (дата звернення: 05.06.2024)
2. Mizuno, S. Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor / Sueyoshi Mizuno, Shinichi Noda, Makoto Matsushita, Taihei Koyama, Shigetomo Shiraishi //IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49, No.4, july/august. — P 1508—1513. <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2256872>
3. Сьомін Д.О., Роговий А.С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія / Д.О. Сьомін, А.С. Роговий – Харків: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 204 с. ISBN 978-617-7577-53-8.
4. Рудавська, А.; Данчак, І.; Мюллер, М.; Валасек, П. Вплив піскоструминної обробки на властивості поверхні для адгезії. Міжнародний журнал адгезії та адгезивів 2016, 70, 176–190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010
5. Сичук В.; Заболотний О.; Сомов Д. Технологія ефективною абразивно-струминної обробки поверхонь деталей. В: Іванов В. та ін. Досягнення в дизайні, моделюванні та виробництві. DSMIE 2018. Конспекти лекцій з машинобудування 2019. Springer, Cham, стор. 166–176. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4\_18
6. Фесенко А.; Басова Ю.; Іванов, В.; Іванова, М.; Євсюкова Ф.; Гасанов М. Підвищення ефективності обладнання шляхом інтенсифікації технологічних процесів. Periodica Polytechnica Машинобудування 2019, 63(1), 67–73. DOI: 10.3311/PPme.13198
7. Арана-Ландін, Г.; Уріарте-Галластегі, Н.; Ландета-Манзано, Б.; Ласкурайн-Ітурбе, І. Внесок ощадливого менеджменту — технологій промисловості 4.0 у підвищення енергоефективності. Енергія 2023, 16(5), 2124. DOI:10.3390/en16052124
8. Ахмед, Ф.; Chen, W. Дослідження параметрів парового ежектора за трьома алгоритмами оптимізації з використанням ШНМ. Прикладна теплотехніка 2023, 225, 120205. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.120205.
9. Сюй, Ю.; Лі, К.; Лі, Б.; Guan, Z. Чисельне моделювання ерозії насадки гідравлічного розриву в глибокій свердловині. Кордони в Фізика 2022, 10, 947094. DOI: 10.3389/fphy.2022.947094
10. Бондаренко Г.; Бага, В.; Башлак І. Моделювання течії в лабіринтовому ущільненні. Прикладна механіка та матеріалознавство 2014, 630, 234–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.630.234

## REFERENCES:

1. Petrenko O. M. (2018) NaukovI osnovi viboru optimalnih parametrIv ta rezhimIv roboti sistem oholodzhennya asinhronnih tyagovih dvigunIv elektrotransportu avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk Nats. tehn. un-t "HarkIv. polItehn. In-t". – HarkIv, 34 p. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3d0d605c-d8bd-4c8c-bb08-ea5083aca885/content>
2. Mizuno, S. Noda, S., Matsushita, M., Koyama, T., & Shiraishi, Sh. (2013) Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor . IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No.4, 1508—1513. <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2256872>
3. Semin D.O., Rogovy A.S. Vortex chamber superchargers: monograph / D.O. Semin, A.S. Horned -. Kharkiv: FOP Mezina V.V., 2017. – 204 p. ISBN 978-617-7577-53-8.
4. Rudawska, A.; Danczak, I.; Müller, M.; Valasek, P. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. International Journal of Adhesion and Adhesives 2016, 70, 176–190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010
5. Sychuk, V.; Zabolotnyi, O.; Somov, D. Technology of Effective Abrasive Jet Machining of Parts Surfaces. In: Ivanov, V., et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering 2019. Springer, Cham, pp. 166–176. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4\_18
6. Fesenko, A.; Basova, Y.; Ivanov, V.; Ivanova, M.; Yevsiukova, F.; Gasanov, M. Increasing of equipment efficiency by intensification of technological processes. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 2019, 63(1), 67–73. DOI: 10.3311/PPme.13198
7. Arana-Landín, G.; Uriarte-Gallastegi, N.; Landeta-Manzano, B.; Laskurain-Iturbe, I. The contribution of lean Management—Industry 4.0 technologies to improving energy efficiency. Energies 2023, 16(5), 2124. DOI:10.3390/en16052124
8. Ahmed, F.; Chen, W. Investigation of steam ejector parameters under three optimization algorithm using ANN. Applied Thermal Engineering 2023, 225, 120205. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.120205.
9. Xu, Y.; Li, Q.; Li, B.; Guan, Z. Numerical simulation study of hydraulic fracturing nozzle erosion in deep well. Frontiers in Physics 2022, 10, 947094. DOI: 10.3389/fphy.2022.947094
10. Bondarenko, G.; Baga, V.; Bashlak, I. Flow simulation in a labyrinth seal. Applied Mechanics and Materials 2014, 630, 234–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.630.234

Надійшла до редакції 04.09.2024 р.