

В. М. БАГА**ОПТИМІЗАЦІЯ СОПЛА ВЕНТУРИ ДЛЯ АБРАЗИВНО-СТРУМИННОЇ УСТАНОВКИ**

Пневмо-абразивна обробка поверхонь є невід'ємною частиною багатьох технологічних процесів з нанесення покриттів, виконання ремонтних чи відновлювальних робіт та ін. Ефективність роботи пневмо-абразивної установки характеризується декількома чинниками. Головним чинником є час обробки поверхні матеріалу. Чим швидше буде виконана обробка поверхні тим вищою буде ефективність обробки, оскільки для роботи пневмо-абразивної установки потрібна велика кількість стисненого повітря та абразивного матеріалу. На ефективність пневмо-абразивної установки найбільшим чином впливає робоче сопло, від конструкції якого залежать характеристики повітряно-абразивної суміші. Робоче сопло призначене для формування струменя та збільшення швидкості робочого потоку, який складається з суцільної та дисперсної фаз. Впливаючи на геометричні розміри та конструкцію сопла можливо варіювати його характеристиками. Під робочими характеристиками сопла розуміють його основні параметри, що впливають на час обробки поверхонь матеріалів, а саме: швидкість робочої суміші на виході з сопла, масова витрата дисперсної та суцільної фаз, сила реакції струменя, значення контактних напружень на оброблюваній поверхні від удару струменя. Мета роботи полягає у виконанні оптимізації геометрії робочого сопла пневмо-абразивної установки. Виконання поставленої мети забезпечується застосуванням плану повного факторного експерименту, виконанням серії чисельних досліджень за допомогою програмного комплексу ANSYS. Одержані результати перевіряються на спеціальному експериментальному стенді по дослідженню робочих сопел пневмо-абразивної установки. В результаті виконаних досліджень надані практичні рекомендації по проектуванню робочих сопел для абразивно-струминної обробки поверхонь матеріалу.

Ключові слова: робоче сопло, пневмо-абразивна установка, робочий процес, суцільна фаза, дисперсна фаза, ефективність обробки.

V. BAGA**OPTIMIZING THE VENTURA NOZZLE FOR ABRASIVE JET PLANT**

Pneumatic abrasive surface treatment is an integral part of many technological processes used for applying coatings, performing repair or doing a restoration work, etc. The operation efficiency of the pneumatic abrasive plant is characterized by several factors. The main factor is the time of surface treatment of the material. The faster the surface treatment, the higher the treatment efficiency since a large amount of compressed air and abrasive material is required for the operation of a pneumatic abrasive plant. The efficiency of the pneumatic abrasive plant is most affected by the operating nozzle, the design of which defines the characteristics of the air-abrasive mixture. The operating nozzle is designed to form a jet and increase the speed of the working flow consisting of continuous and dispersed phases. The effect on the geometric dimensions and design of the nozzle can be varied by its characteristics. The operating characteristics of the nozzle are its main parameters that define the processing time of the material surfaces, in particular the speed of the working mixture at the nozzle outlet, the mass flow rate of the dispersed and continuous phases, the reaction force of the jet, and the value of contact stresses on the processed surface caused by the jet impact. The purpose of this research is to optimize the geometry of the operating nozzle of the pneumatic abrasive plant. The implementation of the set goal is ensured by using the plan of the full factorial experiment, performing a series of numerical studies using the ANSYS software package. The obtained data are verified on a special experimental stand designed for studying the operating nozzles of the pneumatic abrasive plant. Based on the obtained research data we can give practical recommendations for the design of operating nozzles used for the abrasive jet processing of material surfaces.

Key words: operating nozzle, pneumatic abrasive plant, working process, continuous phase, dispersed phase, and the treatment efficiency.

Вступ

Абразивно-струминні установки використовуються для обробки різного роду забруднених поверхонь матеріалів: для видалення старих покриттів, корозії, очистки дерев'яних поверхонь, окалини та ін. Особливістю абразивно-струминної обробки є можливість обробки важкодоступних місць, обробка яких іншими методами неможлива. Термін служби покриттів, нанесених по поверхні, що пройшли пневмо-абразивну обробку, в разі підвищується. Для забезпечення дієздатності абразивно-струминної установки необхідне потужне джерело стисненого повітря з об'ємною витратою $V = 3 - 5 \text{ м}^3/\text{хв}$. Компресор виконує подачу несучого потоку під тиском, що розганяє та розпилює дисперсну фазу. Чим вище значення тиску повітряно-абразивної суміші подати на робоче сопло, тим ефективнішою буде обробка поверхні матеріалу. Конструктивні особливості робочого сопла

задають необхідні режимні параметри установки. Таким чином більш ефективне робоче сопло потребує нижчих значень витрати та тиску суцільної фази, що дає змогу знизити вартість обробки квадратного метру матеріалу.

Головними параметрами сопла абразивно-струминної установки є його геометричний профіль, площа прохідного перетину f та довжина l . Чим більше значення прохідного перетину сопла, тим відповідно більша потреба у стиснутому повітрі, при чому при збільшенні його прохідного перетину відбувається непропорційне збільшення витрати повітря.

В якості абразивного матеріалу в наших дослідженнях використовували річковий пісок. В якості робочих сопел абразивно-струминної установки використовуються різні конфігурації: циліндричні, конічні, сопла Вентурі та ін. Сопла можуть мати різну довжину та діаметри. Негативно впливаючими на роботу сопла чинниками є наявність

сил тертя та гідравлічного опору, тому при проектуванні абразивно-струменевих сопел, це треба враховувати.

Мета роботи

Актуальність роботи виходить з існування необхідності розробки нової, більш ефективної конструкції робочого сопла пневмо-абразивної установки, оскільки саме від конструктивних особливостей робочого сопла залежать такі фактори як час обробки поверхонь матеріалів, якість обробки, витрата абразивного матеріалу, час роботи компресора. Наведені фактори встановлюють вартість обробки матеріалу. Тому *мета роботи* полягає у виконанні оптимізації геометрії робочого сопла пневмо-абразивної установки. Виконання поставленої мети забезпечується застосуванням плану повного факторного експерименту та виконанням серії чисельних досліджень за допомогою програмного комплексу ANSYS. Верифікація одержаних результатів виконується шляхом їх порівняння з результатами експериментальних досліджень, які виконувалися на уніфікованому експериментальному стенді, що заходиться на кафедрі технічної теплофізики СумДУ.

Новизна отриманих результатів полягає у встановленні значущих геометричних розмірів сопла, наданні практичних рекомендацій щодо проектування сопла Вентурі для пневмо-абразивної установки, отримання візуалізацій течії

$$ER = \text{massflowrateofsecondaryfluid} / \text{massflowrateofprimaryfluid}.$$

В роботі [6] виконана перевірка CFD моделювання моделі при двох фазах в межах допустимого діапазону розбіжностей. Отримали до 30 % позитивного ефекту за рахунок оптимізації геометричних параметрів сопла. Що підтверджує суттєву значимість впливу геометрії сопла на його витратні характеристики.

В роботі [7], [8] досліджувалася ерозія сопла в свердловині. Це явище імітує зношення абразивно-струменевого сопла. Встановлено що розмір частинок і масова швидкість потоку є основними факторами, що впливають на ефект ерозії сопла.

В роботі [9] досліджувався процес мікроабразивного очищення. Встановлено що такі змінні, як тип частинок, діаметр сопла, тиск, відстань і час обробки впливають на шорсткість поверхні.

В роботі [10] Було виявлено, що наявність піщинок в соплі сприяє розвитку кавітаційного потоку, а діапазон сприяння концентрації стає меншим із збільшенням середнього діаметра.

У струминній холодильній системі проведено чисельне моделювання внутрішньої структури потоку пароежектора [11]. Виявлено, що діаметр горловини сопла є ключовим параметром, що впливає на продуктивність ежектора та структуру ударної хвилі й внутрішнього потоку.

повітряно-абразивної суміші як в середині сопла, так і за його межами з використанням сучасних методів дослідження.

Виклад основного матеріалу

Показниками ефективності робочого сопла пневмо-абразивної установки можна вважати значення швидкості повітряно-абразивної суміші на виході з сопла, коефіцієнт витрати сопла, силу удару частинки об оброблювану поверхню. Ці параметри перш за все залежить від геометричних та режимних параметрів самого сопла. Проточна частина сопла безпосередньо впливає на розподіл таких параметрів як швидкість, тиск, температура та щільності течії повітряно-абразивної суміші. Підвищення продуктивності сопла завдяки використання оптимального профілю потоку є значним. У порівнянні зі звичайним ежектором при однакових умовах праці коефіцієнт захоплення збільшується на 8,1 % – 19,2 % [1].

Сопло Вентурі забезпечує в 4 – 7 разів більшу ефективність аерації, ніж циліндричні конструкції [2], [3].

В роботі [4], [5] використовують коефіцієнт захоплення (ER) як параметр для опису продуктивності парового ежектора і розраховується як маса захопленої пари робочого потоку ($\text{massflowrateofsecondaryfluid}$) поділена на масову витрату рушійного потоку ($\text{massflowrateofprimaryfluid}$).

В роботі [12] наведено результати досліджень геометричних характеристик багатоступеневих пароструминних ежекторів.

В роботах [13] – [18] працювали над створенням та випробуванням робочого сопла ежекторно-очисної установки з пористим насадком, що дало змогу суттєво підвищити ефективність обробки матеріалу.

Виконували оптимізацію промислового сопла UDC32-450, що зображено на рис. 1, яке працює на піщано-повітряній суміші. Розроблено методику чисельного моделювання. Параметри піску які задавались при моделюванні:

- діаметри піщинок (частинок)..... $D_{part} = 0,2$ мм;
- масова витрата піску (частинок)..... $m_{part} = 0,03$ кг/с;
- витрата повітря..... $m_{пов} = 0,035$ кг/с;
- тиск на виході постійний атмосферний $p = 760$ мм.рт.ст.

За результатами чисельного моделювання робочого процесу витікання повітряно-абразивної суміші з сопла Вентурі визначалися його робочі характеристики. При цьому витрата суміші

$$m_{\text{суміші}} = m_{\text{пов}} + m_{\text{part}}.$$

Дослідження проводились з імітуванням струменя який оброблює поверхню під прямим кутом.

За результатами виконання плану повного факторного експерименту (ПФЕ), було встановлено три значущі геометричні розміри сопла: вихідний радіус $R2$, довжина критичної ділянки $L_{кр}$, довжина дифузornoї частини $L2$, що показано на рис. 2–6.

З табл. 1 та рис. 3 видно, що зі збільшенням дифузornoї частини сопла значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару

піску зростає, що позитивно впливає на робочі характеристики сопла.

Матриця планування експерименту розрахованими робочими параметрами має вигляд табл. 2. Було встановлено, що значущими факторами, які впливають на ефективність сопла є значення довжини критичної $L_{кр}$ його частини та дифузornoї $L2$. Що підтверджують рис. 3 та 4. На рис. 3а та 4а вказана цифра в дужках означає номер параметра (1) – (4), (L) – лінійна залежність, (K) – квадратична, сполучення «на» означає вплив перехресних параметрів (один на інший).

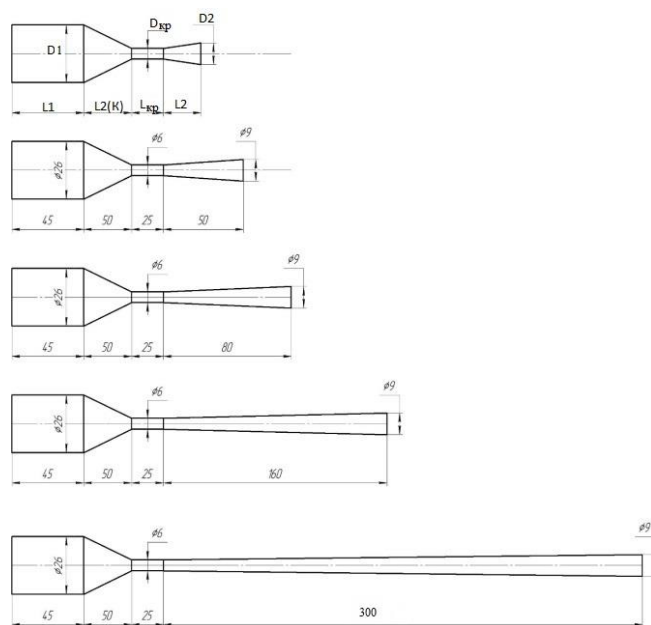


Рис. 1 – Промислове сопло UDC32-450

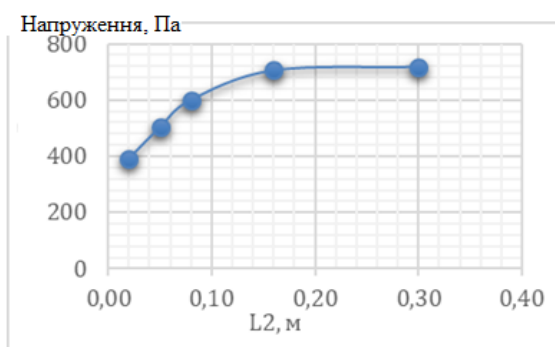


Рис. 2 – Вплив контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску від довжини дифузornoї частини $L2$

Таблиця 1 – Результати оптимізації довжини сопла

$R2$, м	$L1$, м	$L_{кр}$, м	$L2$, м	Напруження, Па	$m_{пов}$, кг/с	m_{part} , кг/с	$P1$, бар	$P2$, бар
0,0050	0,05	0,025	0,02	391,866	0,035	0,03	6,13	1
0,0035	0,05	0,025	0,05	503,009	0,035	0,03	6,16	1
0,0050	0,05	0,025	0,08	600,319	0,035	0,03	6,14	1
0,0043	0,05	0,025	0,016	705,911	0,035	0,03	6,20	1
0,0043	0,05	0,025	0,30	718,245	0,035	0,03	6,26	1

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту з абсолютними значеннями шуканих параметрів

Варіант	Рез.	R2, м	L1, м	L, м	L2, м	ED, кг/(м ² ·с)	Напруження, Па	Fz, Н	m _{пов} , кг/с	m _{part} , кг/с	P1, бар	P2, бар
1	0,05	0,0035	0,02	0,015	0,05	0,00045130	422,594	11,7886	0,035	0,03	6,14	1
2	0,06	0,0065	0,02	0,015	0,05	0,00047128	332,587	9,94598	0,035	0,03	6,11	1
3	0,07	0,0035	0,08	0,015	0,05	0,00018492	425,831	11,1746	0,035	0,03	5,98	1
4	0,08	0,0065	0,08	0,015	0,05	0,00016035	346,615	7,99672	0,035	0,03	5,95	1
5	0,09	0,0050	0,05	0,005	0,02	0,00020048	317,378	11,3019	0,035	0,03	5,71	1
6	0,10	0,0050	0,05	0,025	0,02	0,00023815	391,866	11,1782	0,035	0,03	6,13	1
7	0,12	0,0050	0,05	0,005	0,08	0,00023299	505,589	10,2056	0,035	0,03	5,73	1
8	0,13	0,0050	0,05	0,025	0,08	0,00024615	600,319	10,5480	0,035	0,03	6,14	1
9	0,14	0,0050	0,05	0,015	0,05	0,00023216	452,823	10,7568	0,035	0,03	5,97	1
10	0,15	0,0035	0,05	0,015	0,02	0,00022394	363,483	13,0147	0,035	0,03	5,97	1
11	0,16	0,0065	0,05	0,015	0,02	0,00022883	264,564	7,90856	0,035	0,03	5,96	1
12	0,17	0,0035	0,05	0,015	0,08	0,00022188	531,308	12,0749	0,035	0,03	6,04	1
13	0,18	0,0065	0,05	0,015	0,08	0,00027384	486,483	7,05196	0,035	0,03	5,97	1
14	0,19	0,0050	0,02	0,005	0,05	0,00028061	400,660	10,1394	0,035	0,03	5,81	1
15	0,20	0,0050	0,08	0,005	0,05	0,00017320	389,577	10,2602	0,035	0,03	5,73	1
16	0,21	0,0050	0,02	0,025	0,05	0,00045147	469,263	10,8295	0,035	0,03	6,29	1
17	0,22	0,0050	0,08	0,025	0,05	0,00017539	444,476	10,5174	0,035	0,03	6,11	1
18	0,23	0,0050	0,05	0,015	0,05	0,00022905	451,980	10,7128	0,035	0,03	5,97	1
19	0,25	0,0035	0,05	0,005	0,05	0,00024419	414,993	12,5518	0,035	0,03	5,76	1
20	0,26	0,0065	0,05	0,005	0,05	0,00020921	326,413	7,32272	0,035	0,03	5,71	1
21	0,27	0,0035	0,05	0,025	0,05	0,00024978	503,009	12,4804	0,035	0,03	6,16	1
22	0,28	0,0065	0,05	0,025	0,05	0,00028666	417,955	7,9524	0,035	0,03	6,13	1
23	0,29	0,0050	0,02	0,015	0,02	0,00043799	281,974	12,2963	0,035	0,03	6,04	1
24	0,30	0,0050	0,08	0,015	0,02	0,00017827	356,605	10,2565	0,035	0,03	5,95	1
25	0,31	0,0050	0,02	0,015	0,08	0,000322626	528,518	9,43707	0,035	0,03	6,12	1
26	0,32	0,0050	0,08	0,015	0,08	0,00017883	494,925	10,2009	0,035	0,03	6	1
27	0,33	0,0050	0,05	0,015	0,05	0,000240179	453,913	10,6982	0,035	0,03	5,97	1

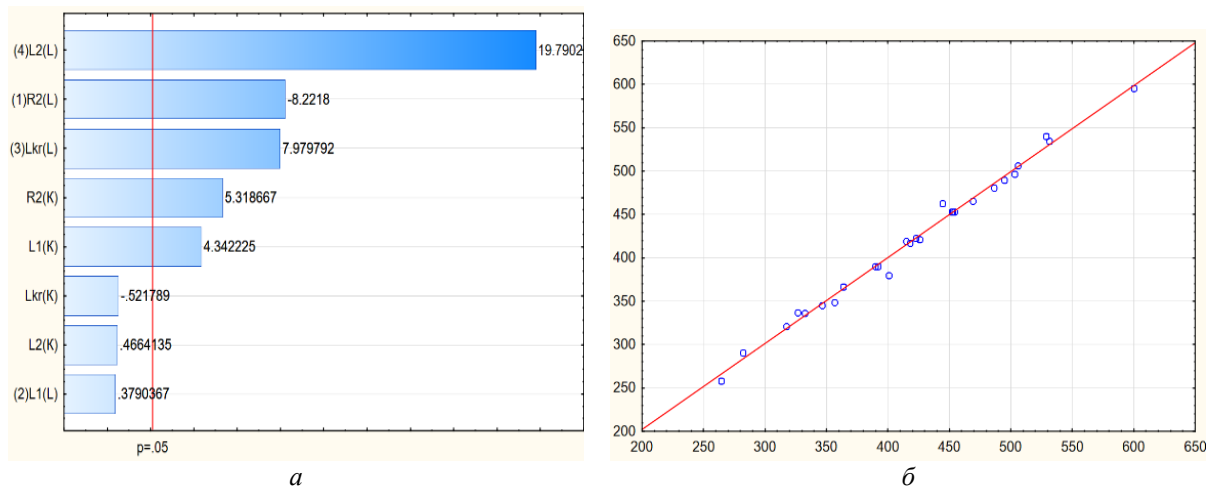


Рис. 3 – Виявлення значущих факторів ефективності сопла:

а – вплив значень довжини сопла L2 на значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску; б – вплив передбачених значень (напруження, Па) на спостережені

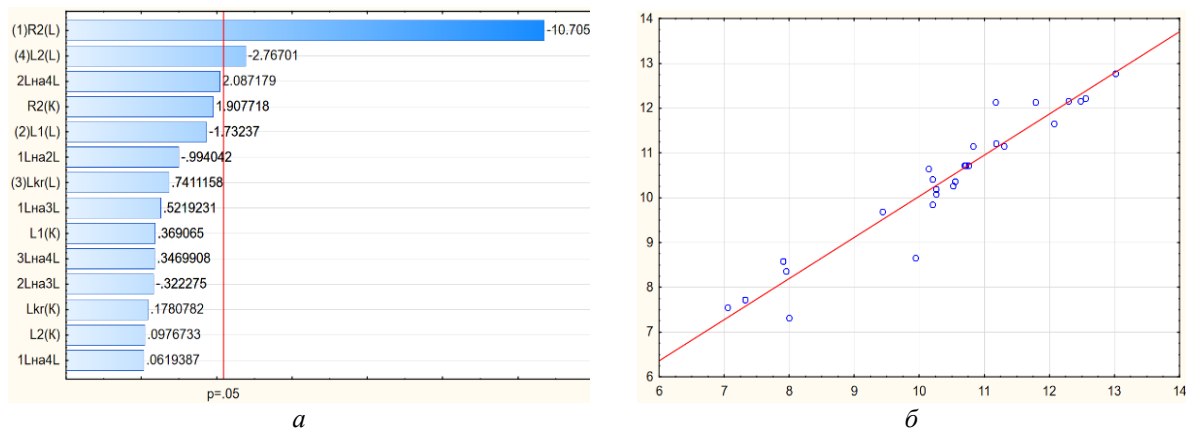


Рис. 4 – Виявлення значущих факторів ефективності сопла:
 а – вплив значень довжини сопла на силу реакції струї F ;
 б – вплив перебачених значень (Fz, H) на спостережені

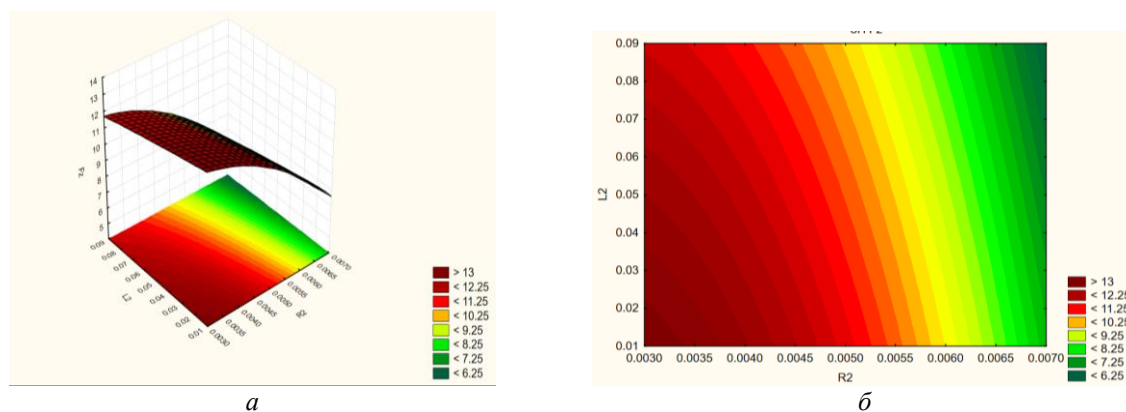


Рис. 5 – Графічне представлення розподілу шуканих параметрів:
 а – поверхня відскоку; б – підігнана поверхня змінної сили струменя F

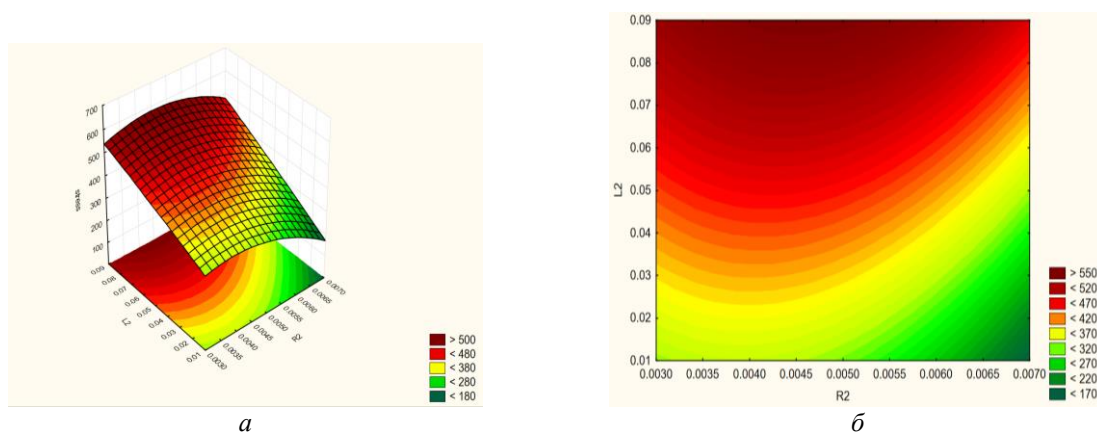
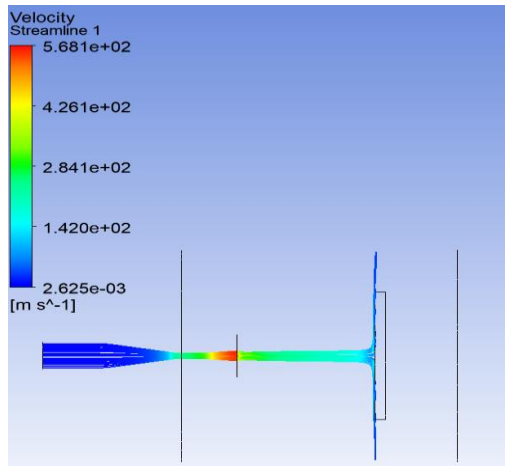
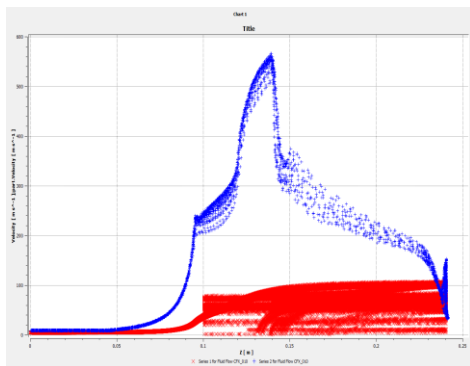


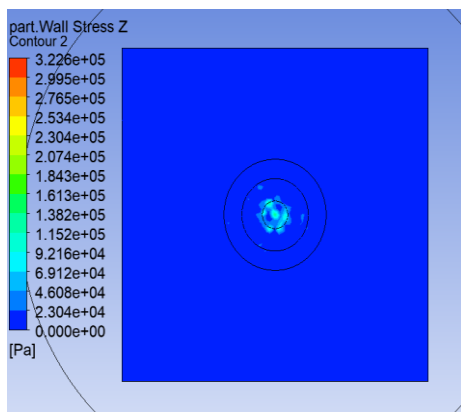
Рис. 6 – Графічне представлення розподілу шуканих параметрів:
 а – поверхня відскоку; б – підігнана поверхня значення контактних напружень
 на оброблювальній поверхні від удару піску (напруження, Па)



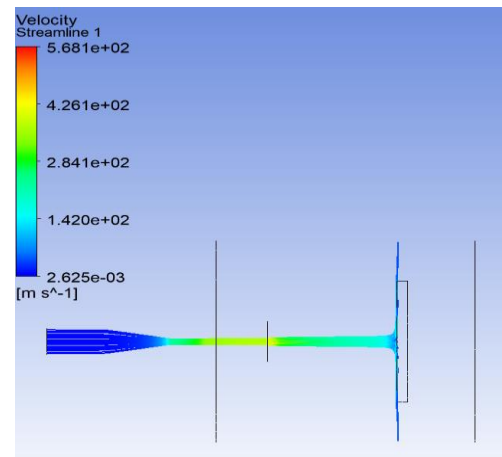
a



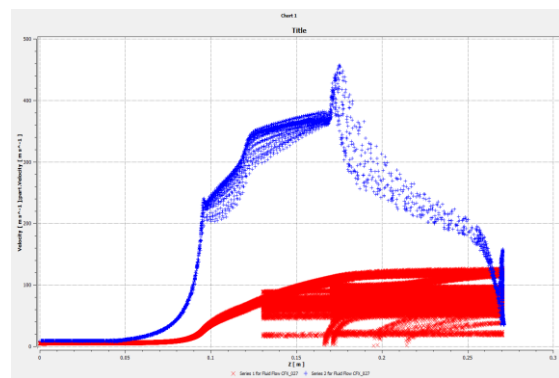
б



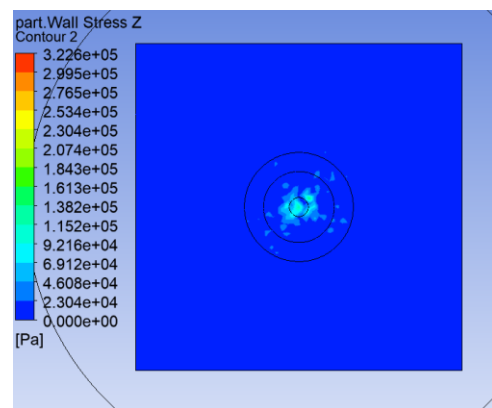
в



a



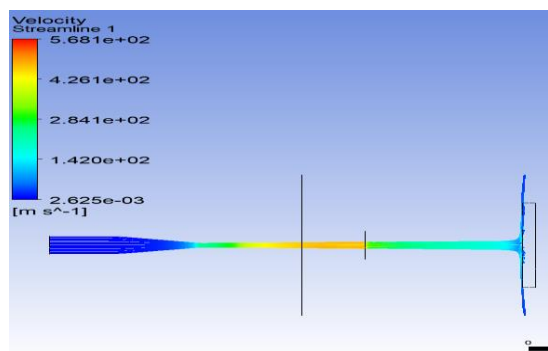
б



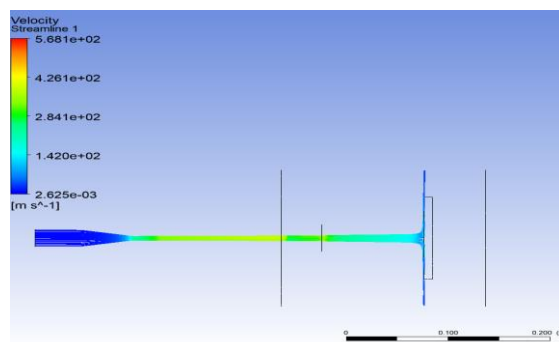
в

Рис. 7 – Візуалізації течії струї повітряно-абразивної суміші сопла Вентурі з довжиною дифузійної частини $L = 20$ мм:
a – заливка із швидкості; *б* – зміна швидкості по довжині: червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху; синій – швидкість струйки току газу (повітря); *в* – значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску

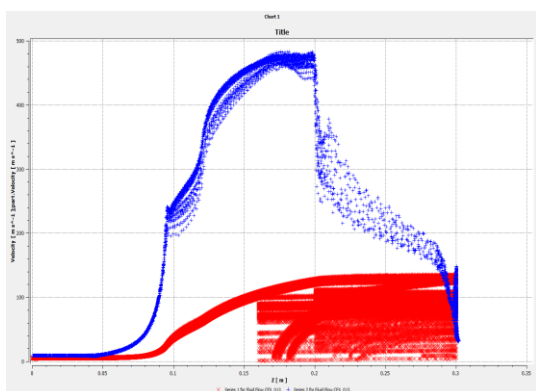
Рис. 8 – Візуалізації течії струї повітряно-абразивної суміші сопла Вентурі з довжиною дифузійної частини $L = 50$ мм:
a – заливка із швидкості; *б* – зміна швидкості по довжині: червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху; синій – швидкість струйки току газу (повітря); *в* – значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску



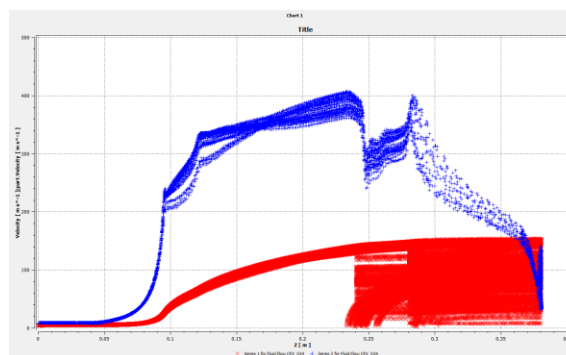
a



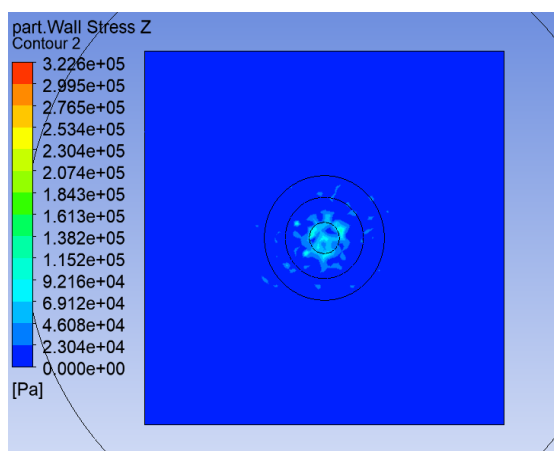
a



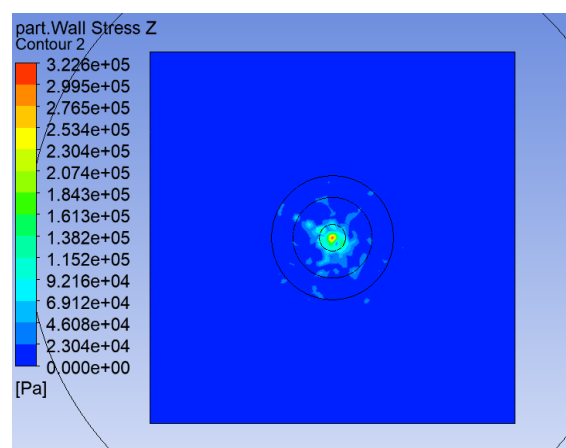
б



б



в



в

Рис. 9 – Візуалізації течії струї повітряно-абразивної суміші сопла Вентурі з довжиною дифузornoї частини $L = 80$ мм:
a – заливка із швидкості; *б* – зміна швидкості по довжині: червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху; синій – швидкість струйки току газу (повітря); *в* – значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску

Рис. 10 – Візуалізації течії струї повітряно-абразивної суміші сопла Вентурі з довжиною дифузornoї частини $L = 160$ мм:
a – заливка із швидкості; *б* – зміна швидкості по довжині: червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху; синій – швидкість струйки току газу (повітря); *в* – значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску

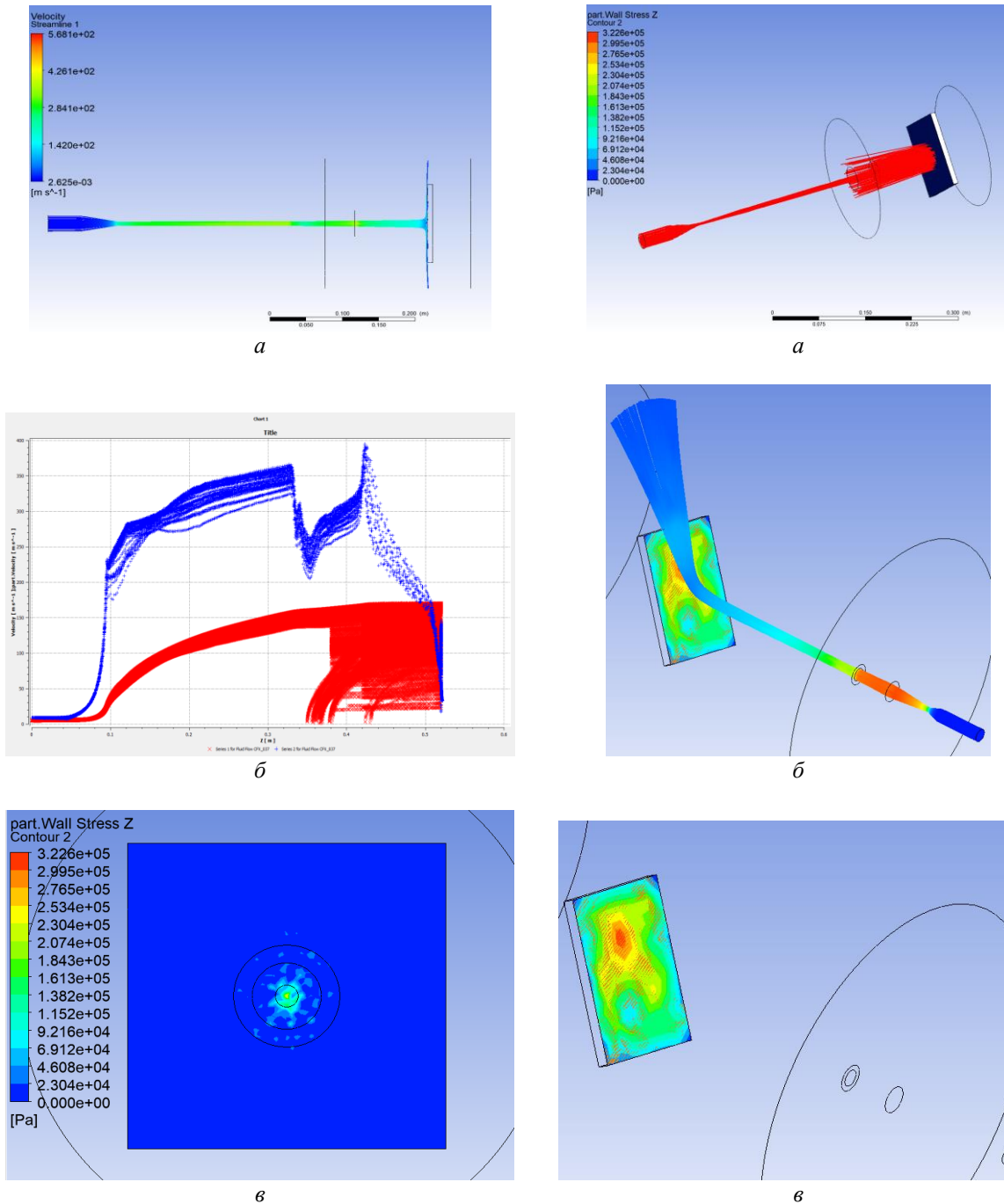


Рис. 11 – Візуалізації течії струї повітряно-абразивної суміші сопла Вентурі з довжиною дифузornoї частини $L = 300$ мм:
 а – заливка із швидкості; б – зміна швидкості по довжині: червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху; синій – швидкість струйки току газу (повітря); в – значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску

Рис. 12 – Значення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску:
 а – зворотній рух піщинок; б – формування струменя; в – розподіл сили удару струменя на плоску пластину

З одержаних візуалізацій наведених на рис. 7–12 спостерігаються відмінності в картинах течії повітряно-абразивної суміші, а саме встановлена наявність зворотного руху абразивних частинок після удару об оброблювану поверхню. Після удару деякі частинки повертаються назад в сопло, після чого загальмувавши набігаючий потік, знову інерційно набирають швидкість.

На рис. 3 виконана оптимізація сопла за рахунок збільшення його довжини дифузornoї частини. Показано підвищення значень контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску від довжини дифузornoї частини L_2 , що позитивно характеризує сопло.

Видно, що швидкість абразивного матеріалу як в середині сопла, так й за його вихідним перетином значно нижча за швидкість суцільного потоку. З чого очевидний вплив діаметру абразивного матеріалу на його швидкість. Підвищення маси частинок призводить до зниження їх швидкості.

Значення контактних напружень від удару піску та швидкість робочої суміші можуть слугувати показниками ефективності сопла на рівні з його коефіцієнтом витрати, оскільки є взаємопов'язаними чинниками, зростання значень яких призводить до скорочення часу обробки поверхонь матеріалу.

Висновки

В даній статті наведено результати чисельних досліджень сопла Вентурі для абразивно-струминної обробки поверхонь матеріалу зі змінними геометричними параметрами.

Виконана оптимізація проточної частини сопла Вентурі з використанням ПФЕ.

Встановлено, що найбільш значущими геометричними розмірами сопла, є наступні його розміри: вихідний радіус R_2 , довжина критичної ділянки $L_{кр}$, довжина дифузornoї частини L_2 .

Отримано якісні візуалізації течії повітряно-абразивної суміші з урахуванням витікаючого з сопла струменя, та його ударяння в оброблювану поверхню.

В результаті встановлено різницю в структурі робочої течії в соплах з різними значеннями довжини дифузornoї частини в діапазоні 0,02 – 0,3 м.

Встановлено, що з підвищенням значення довжини дифузornoї частини сопла Вентурі підвищується його ефективність.

При проектуванні сопла Вентурі для пневмоабразивної установки, варто виконувати дифузornoю його частину значно довшою, а саме $L_2 = 0,15 – 0,3$ м.

Список літератури

1. Fesenko, A. Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes / A. Fesenko, Y. Basova,

V. Ivanov, M. Ivanova, F. Yevsiukova, M. Gasanov // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 63, No. 1. – PP. 67–73. – DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>.

2. Arana-Landín, G. The Contribution of Lean Management—Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency / G. Arana-Landín, N. Uriarte-Gallastegi, B. Landeta-Manzano, I. Laskurain-Iturbe // Energies. – 2023. – Vol. 16, Is. 5. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052124>.

3. Kotliar, A. Ensuring the Economic Efficiency of Enterprises by Multi-Criteria Selection of the Optimal Manufacturing Process / A. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasytsova, M. Litvynenko, O. Zinchenko // Management and Production Engineering Review. – 2020. – Vol. 11, Is. 1. – PP. 52–61. – DOI: <https://doi.org/10.24425/mper.2020.132943>.

4. Rudawska, A. The Effect of Sandblasting on Surface Properties for Adhesion / A. Rudawska, I. Danczak, M. Müller, P. Valasek // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2016. – Vol. 70. – PP. 176–190. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010>.

5. Peñuela-Cruz, C. E. The Effects of Sandblasting on the Surface Properties of Magnesium Sheets: a statistical study / C. E. Peñuela-Cruz, A. Márquez-Herrera, E. Aguilera-Gómez, A. Saldaña-Robles, R. Mis-Fernández, J. L. Peña, F. Caballero-Briones, M. Loeza-Poot, E. Hernández-Rodríguez // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 23. – PP. 1321–1331. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.117>.

6. Pruszczyńska, E. Effect of the Abrasive Blasting Treatment on the Quality of the Pressed Ceramics Joint for a Metal Foundation / E. Pruszczyńska, K. Pietnicki, L. Klimek // Archives of Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 78, Is. 1. – PP. 17–22. – ISSN 1897-2764 (print). – ISSN 2300-8679 (online). – URL: www.archivesmse.org/api/files/view/122205.pdf (accessed 12 June 2024).

7. Ahmed, F. Investigation of Steam Ejector Parameters Under Three Optimization Algorithm Using ANN / F. Ahmed, W. Chen // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 225. – No. 120205. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120205>.

8. Van den Berghe, J. A 1D Model for the Unsteady Gas Dynamics of Ejectors / J. Van den Berghe, B. R. B. Dias, Y. Bartosiewicz, M. A. Mendez // Energy. – 2023. – Vol. 267. – No. 126551. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126551>.

9. Yan, J. Investigation on key geometries optimization and effect of variable operating conditions of a transcritical R744 two-phase ejector / J. Yan, Z. Li, H. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 230, Part A, No. 120733. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120733>.

10. Xu, Y. Numerical Simulation Study of Hydraulic Fracturing Nozzle Erosion in Deep Well / Y. Xu, Q. Li, B. Li, Z. Guan // Frontiers in Physics. – 2022. – Vol. 10. No. 947094. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.947094>.

11. Li, A. Numerical investigation of the effect of primary nozzle geometries on flow structure and ejector performance for optimal design / A. Li, J. Chen, G. Xi, Z. Huang // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37, Is. 5. – PP. 2139–2148. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2101-2>.

12. Aronson, K. E. Features of the Development and Operation of Multistage Steam Jet Ejectors / K. E. Aronson, A. Y. Ryabchikov, N. V. Zhelonkin, D. V. Brezgin, A. L. Demidov, D. Y. Balakin // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70, Is. 4. – PP. 245–253. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601523040018>.

13. Bañon, F. Surface Quality and Free Energy Evaluation of S275 Steel by Shot Blasting, Abrasive Water Jet Texturing and Laser Surface Texturing / F. Bañon, A. Sambruno, M. Batista, B. Simonet, J. Salguero // Metals. – 2020. – Vol. 10, Is. 2. – No. 290. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met10020290>.

14. Kwon, D.-K. Performance Improvement of Micro-Abrasive Jet Blasting Process for Al 6061 / D.-K. Kwon, J.-H. Lee // Processes. – 2022. – Vol. 10, Is. 11. – No. 2247. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112247>.

15. Sychuk, V. Developing New Design and Investigating Porous Nozzles for Abrasive Jet Machine / V. Sychuk, O. Zabolotnyi,

- A. McMillan // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2015. – Vol. 53, Is. 9–10. – PP. 600–605. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9655-1>.
16. Hao, X. Experimental investigation of an improved ejector with optimal flow profile / X. Hao, J. Yan, N. Gao, O. Volovyk, Y. Zhou, G. Chen // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 47. – No. 103089. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103089>.
 17. Kartal, V. Effect of nozzle type on local scour in water jets: An experimental study / V. Kartal, M. E. Emiroglu // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 277. – No. 114323. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114323>.
 18. Xi, X. Experimental investigation on the performance of a novel resonance-assisted ejector under low pressurization / X. Xi, Y. Xin, D. Duan, B. Zhang // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 280. – No. 116778. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116778>.
 7. Ahmed, F., Chen, W. (2023), “Investigation of Steam Ejector Parameters Under Three Optimization Algorithm Using ANN”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 225, no. 120205, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120205>.
 8. Van den Berghe, J., Dias, B. R. B., Bartosiewicz, Y., Mendez, M. A. (2023)m “A 1D Model for the Unsteady Gas Dynamics of Ejectors”, *Energy*, vol. 267, no. 126551, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126551>.
 9. Yan, J., Li, Z., Zhang, H. (2023), “Investigation on key geometries optimization and effect of variable operating conditions of a transcritical R744 two-phase ejector”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 230, part A, no. 120733, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120733>.
 10. Xu, Y., Li, Q., Li, B., Guan, Z. (2022), “Numerical Simulation Study of Hydraulic Fracturing Nozzle Erosion in Deep Well”, *Frontiers in Physics*, vol. 10, no. 947094, <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.947094>.
 11. Li, A., Chen, J., Xi, G., Huang, Z. (2023), “Numerical investigation of the effect of primary nozzle geometries on flow structure and ejector performance for optimal design”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, is. 5, pp. 2139–2148, <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2101-2>.
 12. Aronson, K. E., Ryabchikov, A. Y., Zhelonkin, N. V., Brezgin, D. V., Demidov, A. L., Balakin, D. Y. (2023), “Features of the Development and Operation of Multistage Steam Jet Ejectors”, *Thermal Engineering*, vol. 70, is. 4, pp. 245–253, <https://doi.org/10.1134/S0040601523040018>.
 13. Bañon, F., Sambruno, A., Batista, M., Simonet, B., Salguero, J. (2020), “Surface Quality and Free Energy Evaluation of S275 Steel by Shot Blasting, Abrasive Water Jet Texturing and Laser Surface Texturing”, *Metals*, vol. 10, is. 2, no. 290, <https://doi.org/10.3390/met10020290>.
 14. Kwon, D.-K., Lee, J.-H. (2022), “Performance Improvement of Micro-Abrasive Jet Blasting Process for Al 6061”, *Processes*, vol. 10, is. 11, no. 2247, <https://doi.org/10.3390/pr10112247>.
 15. Sychuk, V., Zabolotnyi, O., McMillan, A. (2015), “Developing New Design and Investigating Porous Nozzles for Abrasive Jet Machine”, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 53, is. 9–10, pp. 600–605, <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9655-1>.
 16. Hao, X., Yan, J., Gao, N., Volovyk, O., Zhou, Y., Chen, G. (2023), “Experimental investigation of an improved ejector with optimal flow profile”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, no. 103089, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103089>.
 17. Kartal, V., Emiroglu, M. E. (2023), “Effect of nozzle type on local scour in water jets: An experimental study”, *Ocean Engineering*, vol. 277, no. 114323, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114323>.
 18. Xi, X., Xin, Y., Duan, D., Zhang, B. (2023), “Experimental investigation on the performance of a novel resonance-assisted ejector under low pressurization”, *Energy Conversion and Management*, vol. 280, no. 116778, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116778>.

References (transliterated)

1. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. (2019). “Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes”, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 67–73, <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>.
2. Arana-Landín, G., Uriarte-Gallastegi, N., Landeta-Manzano, B., Laskurain-Iturbe, I. (2023), “The Contribution of Lean Management—Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency”, *Energies*, vol. 16, is. 5, <https://doi.org/10.3390/en16052124>.
3. Kotliar, A., Basova, Y., Ivanov, V., Murzabulatova, O., Vasytsova, S., Litvynenko, M., Zinchenko, O. (2020), “Ensuring the Economic Efficiency of Enterprises by Multi-Criteria Selection of the Optimal Manufacturing Process”, *Management and Production Engineering Review*, vol. 11, is. 1, pp. 52–61, <https://doi.org/10.24425/MPER.2020.132943>.
4. Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M., Valasek, P. (2016), “The Effect of Sandblasting on Surface Properties for Adhesion”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 70, pp. 176–190, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010>.
5. Peñuela-Cruz, C. E., Márquez-Herrera, A., Aguilera-Gómez, E., Saldaña-Robles, A., Mis-Fernández, R., Peña, J. L., Caballero-Briones, F., Loeza-Poot, M., Hernández-Rodríguez, E. (2023), “The Effects of Sandblasting on the Surface Properties of Magnesium Sheets: a statistical study”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 1321–1331, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.117>.
6. Pruszczyńska, E.; Pietnicki, K.; Klimek, L. (2016), “Effect of the abrasive blasting treatment on the quality of the pressed ceramics joint for a metal foundation”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 78, is. 1, pp. 17–22, ISSN 1897-2764 (print), ISSN 2300-8679 (on-line), Access mode: www.archivesmse.org/api/files/view/122205.pdf (accessed 12 June 2024).

Надійшла (received) 09.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Бага Вадим Миколайович (Baha Vadim) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики СумДУ, Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies, Sumy State University, 2, Rymyskogo-Korsakova St., 40007 Sumy, Ukraine; v.baga@kttf.sumdu.edu.ua, тел. 066-744-06-08, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-695X>.

Висловлюю вдячність за консультації науковому консультанту Павленко Івану Володимировичу. Робота виконана в рамках держбюджетного фінансування проекту молодих вчених 2024–2026 р., д/б № 51.15.01-24/26.ЗП-01, «Розробка мобільно ежекторно-очисної установки для відновлення будівель, споруд та техніки після пожеж у військовий період». Державний реєстраційний номер: 0124U000636. Дата реєстрації: 22-01-2024.