

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОЧОГО СОПЛА ПНЕВМОАБРАЗИВНОЇ ЕЖЕКТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Бага Вадим Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-0258-695X

v.baga@kttf.sumdu.edu.ua

Пневмоабразивна установка набула широкого поширення в ряді технологічних операцій з обробки поверхонь матеріалу будь-яких форм та забруднень. Метод абразиво-струминної обробки використовується дуже давно в силу своєї простоти та ефективності. Для роботи пневмоабразивної установки необхідне стиснене повітря у великій кількості. Такі установки використовують в якості джерела стисненого повітря компресори з витратою 0,35-5,25 м³/хв, робота яких потребує споживання електроенергії порядку 25-40 кВт. Основним елементом пневмоабразивної установки, що впливає на ефективність її роботи та кількість споживання електроенергії є робоче сопло. Таким чином розроблення більш ефективної конструкції робочого сопла у порівнянні з існуючими аналогами призведе до скорочення споживання дорогого повітря та часу обробки матеріалу.

За допомогою чисельного дослідження з використанням комплексу ANSYS CFX 9 R1 встановили, що зі збільшенням масової витрати піску масова витрата повітря зменшується, що зумовлено пропускну здатністю самого сопла. Виявлено, що під час зменшення швидкості газу після стрибка тиску швидкість піщинок не зменшується, але і майже не зростає. Також встановили, що з ростом значення тиску перед соплом зростає значення швидкості піщинок на виході з сопла. Зі зменшенням діаметра піщинок зростає значення їх швидкості при однаковому тиску та витраті піску.

Досліджено вплив довжини дифузornoї частини сопла на значення швидкості частинок дисперсної фази. Встановлено, що зі збільшенням дифузornoї довжини сопла збільшується значення швидкості піщинок майже в тричі у порівнянні з промисловим соплом, що спричиняє збільшення контактних напружень на оброблювальній поверхні від удару піску. Чим більше значення контактних напружень тим сопло ефективніше. Експериментально підтверджена доцільність збільшення довжини дифузornoї частини сопла Вентурі у порівнянні з промисловим соплом UDC32-450. Так, час обробки квадратного метру матеріалу з довжиною дифузornoї частини сопла $l=300$ мм знизився в 4 рази.

Ключові слова: пневмоабразивна ежекторна установка, робоче сопло, сопло Вентурі, геометричні параметри, режимні параметри, контактні напруження, оброблювана поверхня, поверхневий шар, знос, зносостійкість.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.1>

Вступ. Пневмоабразивні установки набули широкого поширення в багатьох сферах по обробці різного роду забруднених поверхонь матеріалів. Завдяки абразиво-струменевій обробці стає можливим якісна обробка конструкцій будь-яких форм та матеріалів. Абразиво-струминні апарати – це пристрої, що використовуються для холодної абразивної обробки металевих та неметалічних поверхонь. Джерело стисненого повітря виконує подачу несучого потоку під тиском, що розпилює абразив чим дозволяє досягти кількох ступенів очищення:

- грубе очищення з ефектом металевої щітки;
- повне видалення корозії, окалини, фарби;
- очищення металевих поверхонь майже до блиску;

Абразиво-струменева установка є конструктивно простою, головними частинами що впливають на ефективність її роботи є дозуючий кран та ежектор (сопло) де відбувається змішування повітря з абразивним матеріалом. Головними параметрами сопла абразиво-струменевої установки є його геометрична форма, площа прохідного перетину f та довжина l . Чим більше значення прохідного перетину сопла, тим відповідно більша потреба у стиснутому повітрі. В якості абразивного матеріалу використовують річковий або кварцевий пісок, корунд, скляні кульки, металеву дріб та ін.

У сучасній обробці матеріалів очищення їх поверхонь є однією з головних стадій перед нанесенням різних антикорозійних і декоративних захисних покриттів. Термін служби покриттів, нанесених по поверхні, що пройшли пневмоабразивну обробку, суттєво збільшується. Використання такого методу обробки матеріалу здатне забезпечити високу продуктивність і короткі терміни виконання робіт.

Одним з найважливіших завдань розвитку пневмоабразивного обладнання є забезпечення ефективної роботи сопла. Показниками ефективності сопла можна обрати швидкість витікання повітря, дисперсної фази та силу удару дисперсної частинки об поверхню оброблюваного матеріалу. В якості робочих сопел використовуються конструкції різних форм: циліндричні, конічні, сопла Вентурі та ін. Сопла можуть мати різну довжину та діаметри. Суттєво впливають на їх роботу сили в'язкісного тертя, наявність пограничних слоїв та гідравлічний опір робочої суміші (Kondus, 2023; Pavlenko, 2023; Kulikov, 2022).

Постановка проблеми. В процесі роботи з абразивним матеріалом робоче сопло піддається зносу, в результаті чого збільшується величина внутрішнього діаметра d , та зміни профіля сопла, що знижує ефективність його

роботи. Оскільки робоче сопло абразивоструменевої установки є витратною частиною, яка потребує періодичної заміни, від ефективності його роботи, зносостійкості та ціни залежить вартість обробки поверхонь.

Таким чином, існує необхідність в глибокому дослідженні течії повітряно-абразивної суміші в робочому соплі пневмоабразивної ежекторної установки. Дослідження взаємодії несучої фази з дисперсною в робочому соплі та впливу на його характеристики відносять до фундаментальних проблем технічної газової динаміки, оскільки дозволяють на їх основі вирішити низку суміжних науково-технічних завдань, які є актуальними під час моделювання процесів та проектування проточної частини робочого сопла. Варто зауважити, що суттєвий вплив на ефективність робочого сопла пневмоабразивної ежекторної установки чинять ряд геометричних та режимних факторів зокрема, наявність твердої фази, контактування абразиву з вологою, шорсткість поверхні сопла, геометричні розміри сопла, вплив зносу сопла, вплив зміни витрати несучого потоку в процесі роботи ежекторно-очисної установки, тощо.

Основною метою дослідження є встановлення значимості впливу фракції абразивного матеріалу та довжини сопла на значення швидкості повітряно-абразивної суміші в середині сопла та за його зрізом.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідження проточної частини сопла Вентурі;
- проектування сопла Вентурі зі змінною довжиною l ;
- проведення чисельного дослідження проточної частини сопла;
- виявити вплив збільшення масової витрати піску через сопло на розподіл швидкості повітря та дисперсної фази;
- отримання картини розподілу швидкості повітря та дисперсної фази при різних фракціях піску в середині сопла;
- отримання візуалізацій течії;
- побудова графіку залежності довжини сопла від його ефективності;
- оцінювання одержаних результатів.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктом дослідження є робоче сопло пневмоабразивної ежекторної установки форми Вентурі. Для дослідження було створено експериментальну установку для дослідження характеристик робочих сопел в широкому діапазоні геометричних та режимних параметрів та розроблено розрахункову модель для виконання серії чисельних досліджень в програмному комплексі ANSYS 2019R1 (Baħa, 2024).

Слід зазначити, що ANSYS CFX неодноразово випробувався при вирішенні подібних задач, розбіжність результатів чисельного і фізичного моделювання не перевищує 5%, тому даний програмний продукт придатний для вирішення поставленого завдання дослідження (Baħa, 2024; Rogovyi, 2020; Rogovyi, 2020; Korohodskyi, 2020; Lishchenko, 2022; Baħa, 2023).

Для оптимізації промислового сопла UDC32-450 на пісчаноповітряній суміші було проведено чисельні

дослідження в програмному комплексі ANSYS за розробленою методикою.

1. Задавався тиск на вході (тиск на виході постійний атмосферний).

2. При таких умовах визначалась витрата повітря $m_{\text{повітря}}$, кг/с.

3. При цьому витрата суміші $m_{\text{суміші}} = m_{\text{повітря}} + m_{\text{part}}$. Для досліджень в якості абразиву використовували річковий пісок діаметром 0,5 мм.

4. Задавались два робочих середовища: *flued* – повітря і *particle* – частинки піску з заданим діаметром. Для *flued* модель турбулентності *sst*, модель *Total Energy*, для частинок обираємо масову витрату цих частинок.

5. На вході для *flued* задаємо тиск та температуру, на виході – тиск. На стінці задавали шорсткість 3,2 мкм.

Властивості повітря – рівняння стану задавалась густина піщинки та її діаметр, теплообмін не враховували.

На першому етапі виконували розрахунок промислового сопла UDC32-450 (рис. 1). Розмір $V1 = 45$ мм заданий для імітації прямої ділянки, утвореної за рахунок наявності соплотримача. Цей розмір змодельований задля максимального наближення структури течії перед початком сопла до реальних умов.

Параметри піску, які задавались при моделюванні: $D_{\text{part}} = 0,2-0,8$ мм – діаметри піщинок (частинок), $m_{\text{part}} = 0,03$ кг/с – масова витрата піску (частинок); задавалась витрата повітря: $m_{\text{повітря}} = 0,035$ кг/с; тиск на виході постійний атмосферний.

При таких умовах визначались тиск на вході та зміну швидкості потоку повітря і піщинок.

При цьому витрата суміші $m_{\text{суміші}} = m_{\text{повітря}} + m_{\text{part}}$.

При дослідженнях впливу діаметра піщинок дослідження велись по довжині самого сопла без вихідного струменя (рис. 2).

Фізичний експеримент проводився на спеціальному стенді, сопла Вентурі зі змінними значеннями довжини l виготовлялися на 3D-принтері (Baħa, 2024) (рис. 3).

Результати. На першому етапі дослідження проводилося чисельне моделювання сопла UDC32-450 (рис. 4–7). Розрахункова модель обмежена геометрією самого сопла. Вихід струменя не моделювався. Набуло подальшого розвитку дослідження впливу збільшення масової витрати піску через дане сопло на значення швидкості суцільної та дисперсної фаз при ($d_{\text{gr}} = 6$ мм) абсолютний тиск на вході $P1_{\text{абс}} = 2$ бар (абсолютний тиск на виході $P2_{\text{абс}} = P_{\text{ос}} = 1$ бар), $D_{\text{part}} = 0,4$ мм (Baħa, 2024).

З отриманих візуалізацій видно, що зі збільшенням масової витрати піску, масова витрата повітря зменшується, що зумовлено пропускнуою здатністю самого сопла. з графіку видно, що швидкість частинок менша за швидкість несучого потоку. Масова витрата піску в досліджуваному діапазоні значень практично не впливає на швидкість піщинок на виході з сопла, що погоджується з (Aronson, 2023; Bañon, 2020; Kwon, 2022; Sychuk, 2015; Hao, 2023; Kartal, 2023; Xi, 2023).

На другому етапі набуло подальшого розвитку дослідження впливу діаметру піщинок дисперсної фази на

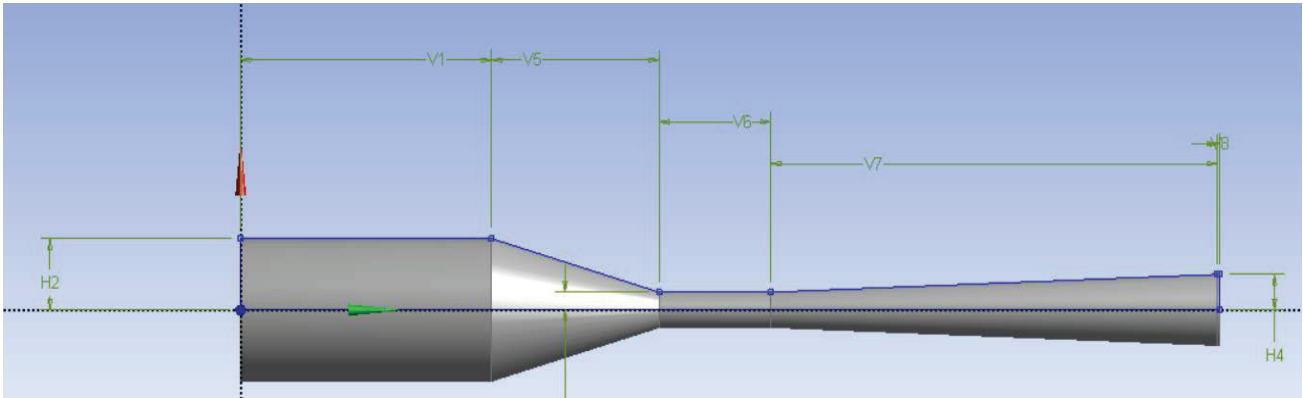


Рис. 1. Розміри і 3D-модель промислової проточної частини промислового сопла UDC32-450 (критичний діаметр $d_{kr} = 6\text{ мм}$): $V1 = 45\text{ мм}$; $V5 = 30$; $V6 = 20\text{ мм}$; $V7 = 80\text{ мм}$; $H2 = 16\text{ мм}$; $H4 = 6\text{ мм}$

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
Default Domain	61.0 OK			3 OK			14 OK		
Default Domain	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
Default Domain	0	0	100	0	0	100	0	0	100

Domain Name : Default Domain

Total Number of Nodes	=	263700
Total Number of Elements	=	253456
Total Number of Prisms	=	1752
Total Number of Hexahedrons	=	251704
Total Number of Faces	=	21592

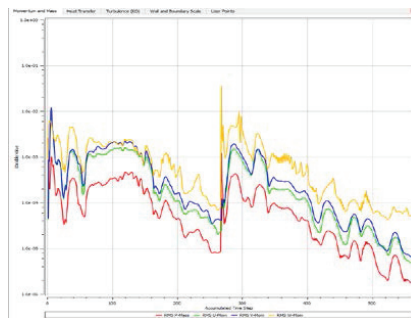
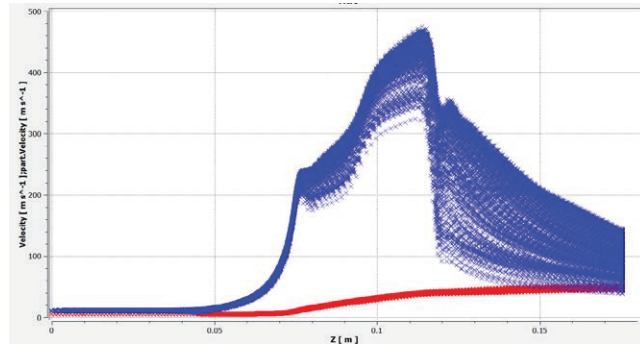


Рис. 2. Оцінка сходимості отриманих результатів

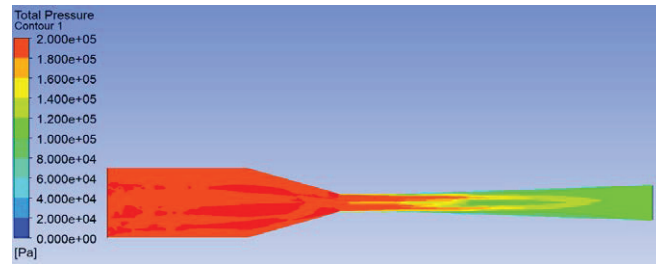


а) б)

Рис. 3. Виготовлення сопла Вентурі: а – 3D-принтер, б – сопло з соплотримачем

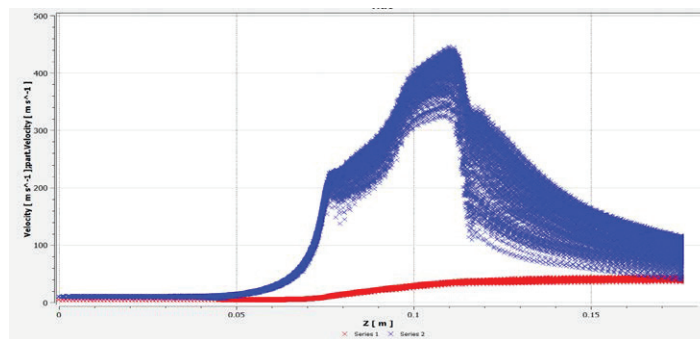


а)

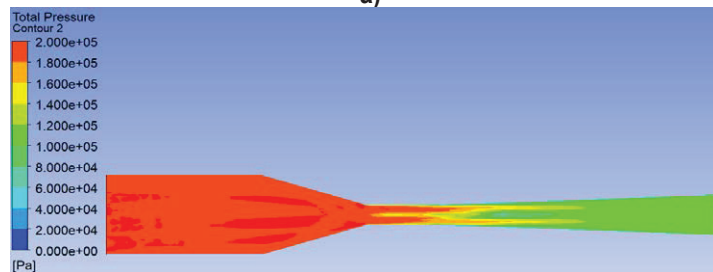


б)

Рис. 4. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $m_{part} = 0,0124$ кг/с: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,0112$ кг/с, $m_{part} = 0,0124$ кг/с

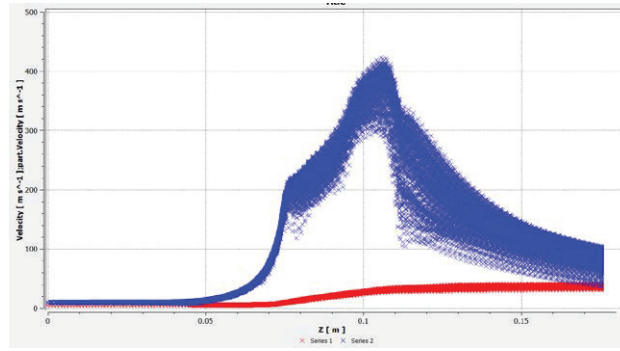


а)

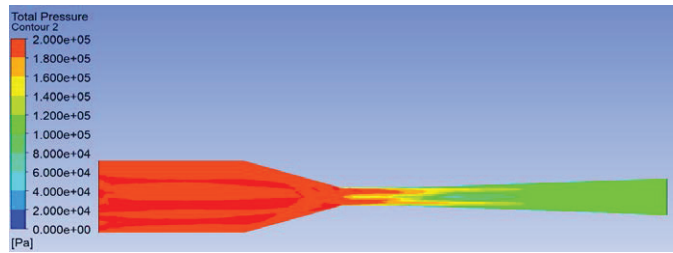


б)

Рис. 5. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $m_{part} = 0,024$ кг/с: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,0107$ кг/с, $m_{part} = 0,024$ кг/с

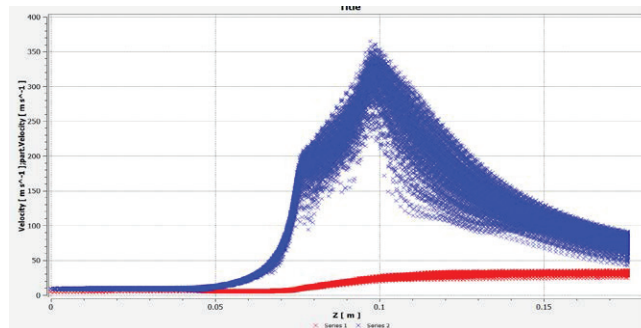


а)

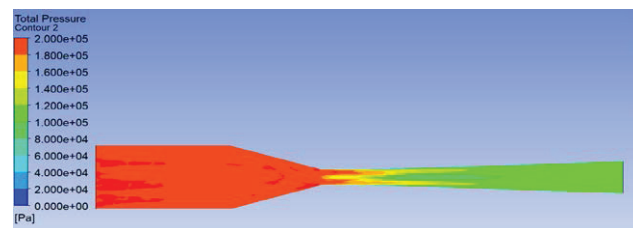


б)

Рис. 6. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $m_{part} = 0,036$ кг/с: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,0102$ кг/с, $m_{part} = 0,0124$ кг/с



а)



б)

Рис. 7. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $m_{part} = 0,06$ кг/с: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,0094$ кг/с, $m_{part} = 0,06$ кг/с

зміну швидкості повітря та піску всередині сопла (Вага, 2024) UDC32-450 (критичний діаметр $d_{kr} = 6$ мм), абсолютний тиск на вході $P1_{абс} = 6$ бар (абсолютний тиск на виході $P2_{абс} = P_{ос} = 1$ бар). Значення масової витрати дисперсної фази $m_{part} = 0.03$ кг/с не змінювалося. Розглядали дисперсну фазу з трьома значеннями діаметрів частинок $D_{part} = 0,1$ мм, $0,4$ мм та $0,8$ мм (рис. 8–10). Дослідження проводились з імітуванням струменя, який оброблює поверхню під прямим кутом.

В результаті виявлено, що під час зменшення швидкості газу після стрибка тиску швидкість піщинок не зменшується, але і майже не зростає. Видна необхідність збільшення довжини ділянки сопла де швидкість газу зростає щоб зменшити градієнт зростання і збільшити тривалість прискорення частинок.

Отримані заливки повного тиску з дисперсною фазою та без неї різні, що говорить про суттєвий вплив дисперсної фази на характеристики течії, що погоджується з (Han, 2022; Fesenko, 2018; Zabolotnyi, 2019; 22-24; Zabolotnyi рік; Sychuk, рік; Povstyanoi, 2015 19-25).

Чим вище задавати значення тиску перед соплом, тим вищі значення швидкості піщинок на виході з сопла отримаємо. В свою чергу чим менше діаметр піщинок, тим вище значення швидкості при рівних значеннях тиску та витраті піску.

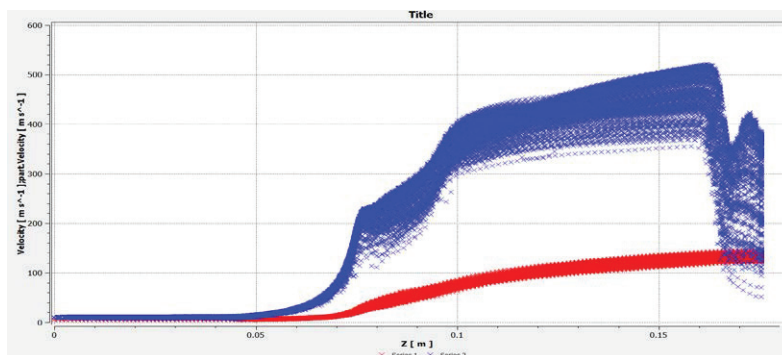
На третьому етапі досліджували довжину дифузornoї частини, оскільки набір швидкості в соплі відбувається саме в дифузornoї його частині. Задавалися оптимізовані значення геометрії сопла: вихідному діаметрі сопла 9 мм,

вхідний діаметр 26 мм, довжина конфузора змінена з 30 на 50 мм, довжина вузької частини діаметром 6 мм змінена з 20 на 25 мм. Варіювали значеннями $V7$ ($L2$ в таблиці).

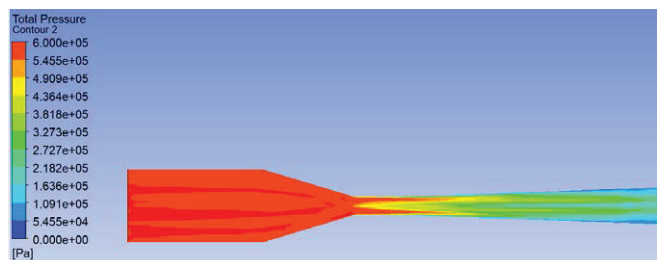
З рисунку 11 видно, що збільшення дифузornoї довжини сопла більше значення $L2 = 0,3$ м не призводить до подальшого зростання контактних напружень на оброблюваній поверхні, більш того значну довжину дифузornoї частини сопла виготовити проблематично.

З отриманих результатів видно, що зі збільшенням довжини сопла збільшує значення швидкості піщинок майже в три рази у порівнянні з промисловим соплом, що збільшує на контактні напруження на оброблювальній поверхні від удару піску. Чим більше значення контактних напружень, тим сопло ефективніше.

Обговорення. Досліджуючи промислове сопло UDC32-450 на предмет виявлення впливу збільшення масової витрати піску через дане сопло на значення швидкості суцільної та дисперсної фаз встановили, що зі збільшенням масової витрати піску масова витрата повітря зменшується, що зумовлено пропускнуою здатністю самого сопла, що погоджується з (Povstyanoi, 2015; Bondarenko, 2018; Bondarenko, 2014; Kosheleva, 1999; Jianxin, 2005; Jianxin, 2008). З отриманих графіків (рис. 4-7) видно, що швидкість частинок менша за швидкість несучого потоку, що пояснюється наявністю втрат на тертя та переміщення абразивного матеріалу. Чим більша вага дисперсної фази, тим важче суцільній фазі її переміщати та розганяти. Встановлено, що масова витрата піску в досліджуваному діапазоні значень практично не впливає на швидкість піщинок

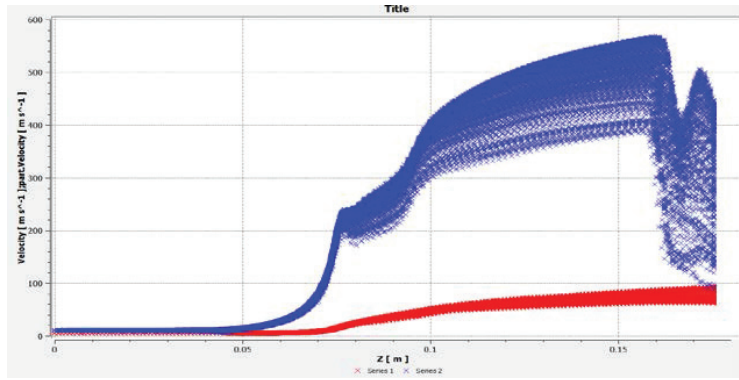


а)

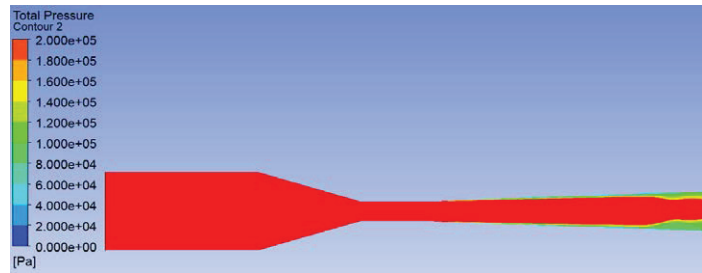


б)

Рис. 8. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $D_{part} = 0,1$ мм: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,0316$ кг/с

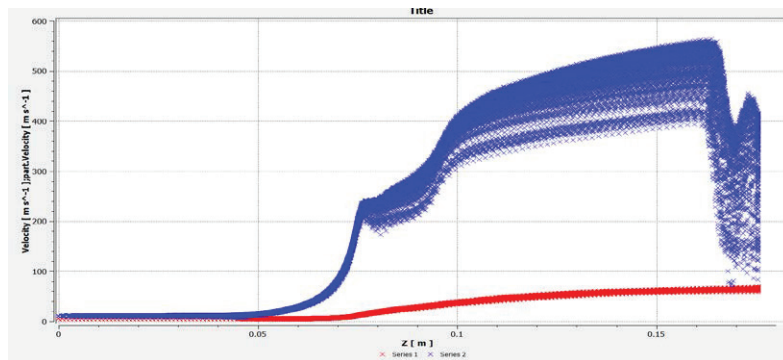


а)

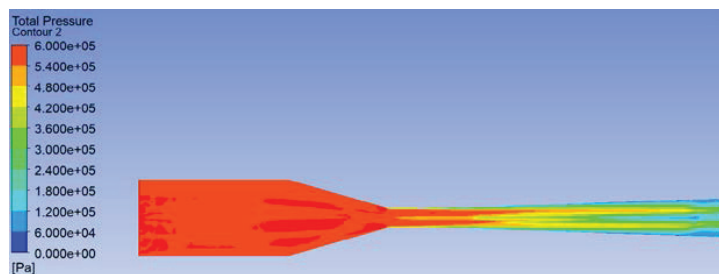


б)

Рис. 9. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $D_{part} = 0,4$ мм: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,033$ кг/с



а)



б)

Рис. 10. Зміна робочих параметрів уздовж сопла при $D_{part} = 0,8$ мм: а – швидкості по довжині (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільної фази); б – зміна повного тиску суцільної фази при: $m_{повітря} = 0,03375$ кг/с

Результати розрахунку сопла Вентурі UDC32-450

L1, м	Lkr, м	L2, м	stress, Pa	m _{air} , кг/с	m _p , кг/с	P1, bar	P2, bar
0.05	0.025	0.02	391.866	0.035	0.03	6.13	1
0.05	0.025	0.05	503.009	0.035	0.03	6.16	1
0.05	0.025	0.08	600.319	0.035	0.03	6.14	1
0.05	0.025	0.16	705.911	0.035	0.03	6.20	1
0.05	0.025	0.30	718.245	0.035	0.03	6.26	1

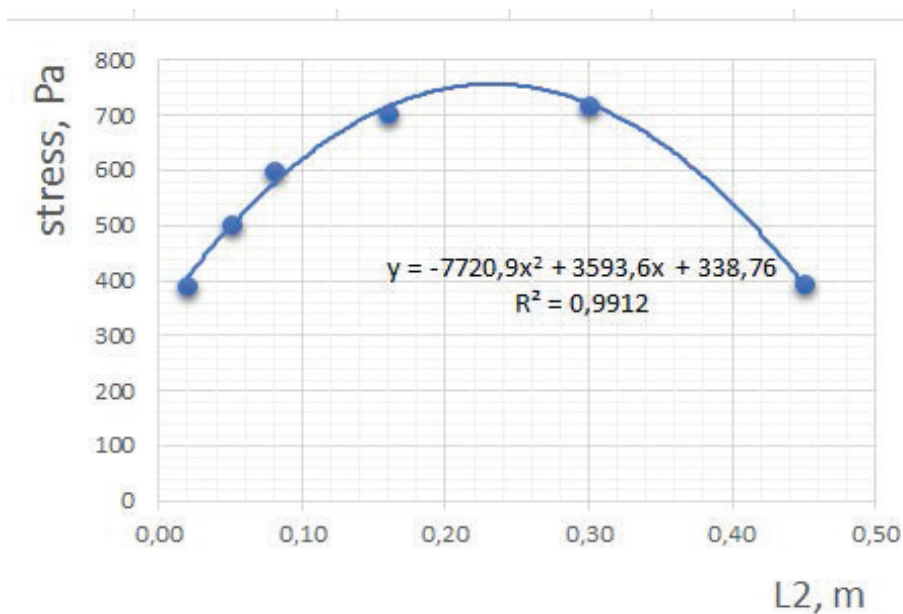
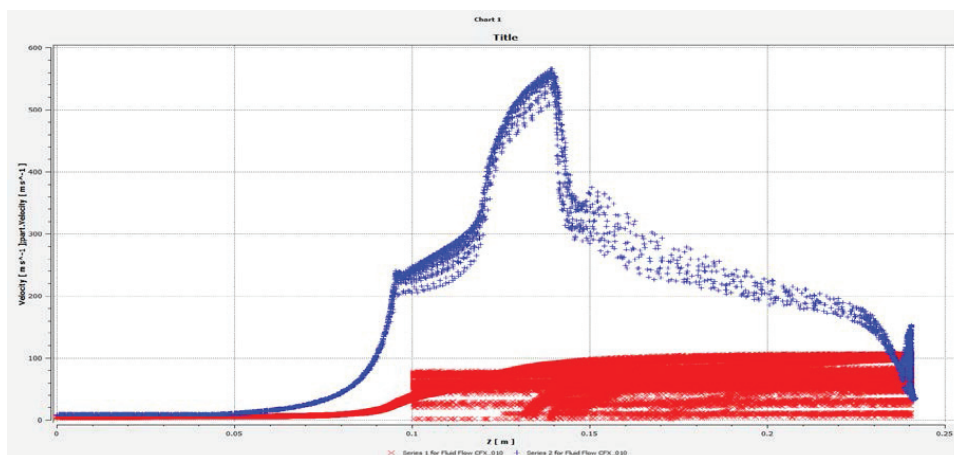
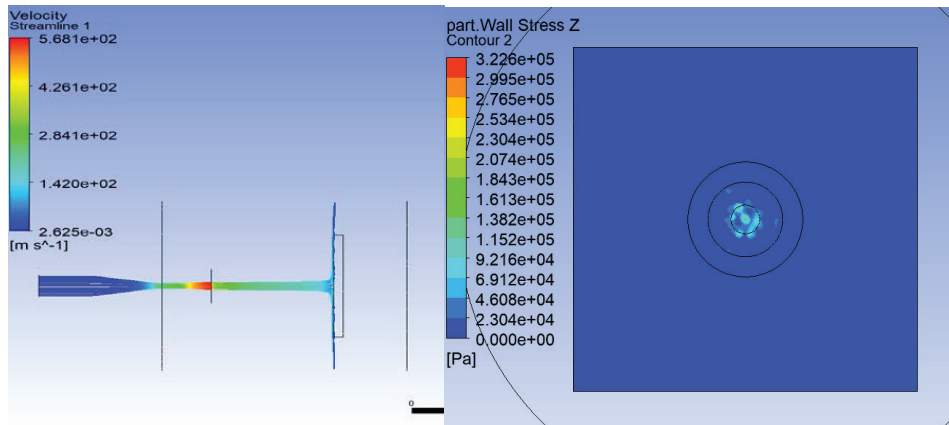


Рис. 11. Вплив довжини дифузійної частини сопла Вентурі на контактні напруження на оброблювальній поверхні від удару піску



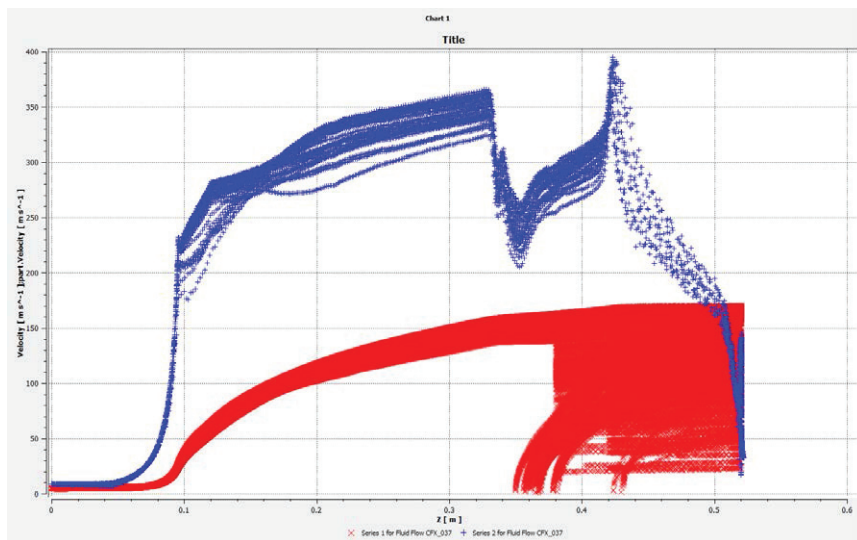
a)



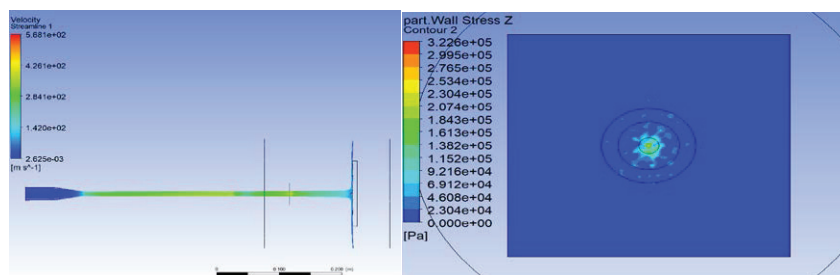
б)

в)

Рис. 12. Розподіл робочих параметрів уздовж сопла з довжиною дифузора $L_2 = 20$ мм (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільного середовища): а – лінії току повітряно-абразивної суміші; б – заливка по швидкості; в – контактні напруження на оброблювальній поверхні від удару піску



а)



б)

в)

Рис. 13. Розподіл робочих параметрів уздовж сопла з довжиною дифузора $L_2 = 300$ мм (червоний – швидкість частинок піску на траєкторіях їх руху, синій – швидкість струйки току суцільного середовища): а – лінії току повітряно-абразивної суміші; б – заливка по швидкості; в – контактні напруження на оброблювальній поверхні від удару піску

на виході з сопла. Експериментально доведено, що надмірна подача дисперсної фази, призводить до заповнення нею проточної частини сопла, що унеможливує проходження необхідної кількості повітря та втрати швидкості течії. Таким чином, робота пневмоабразивної ежекторної установки з оброблення поверхонь матеріалу набуває режиму транспортування дисперсної фази. Даний факт обумовлює важливість коректного налаштування подачі дисперсної та суцільної фаз.

Для підвищення ефективності сопла необхідно взяти заходів щодо забезпечення отримання максимально можливої швидкості частинок дисперсної фази на виході з сопла. Встановлено вплив діаметру частинок дисперсної фази на ефективність сопла. Чим менше значення діаметру частинок, тим їх більшу швидкість можна

отримати, що пояснюється меншою вагою дрібніших частинок, що призводить до їх більшої інерційності.

За результатами дослідження впливу довжини сопла на ефективність його роботи встановили, що збільшувати слід дифузорну частину, оскільки зміна геометрії конфузорної частини не здійснює суттєвого впливу на вихідну швидкість з сопла. Результати чисельних розрахунків, показали доцільність збільшення довжини дифузорної частини сопла. Отриманий результат вдалося підтвердити експериментально, шляхом виготовлення відповідних конструкцій сопел Вентурі та їх тестування на експериментальному стенді, що знаходиться на кафедрі технічної теплофізики СумДУ.

З отриманої візуалізації на рис. 15 встановлена наявність зворотного руху частинок дисперсної фази

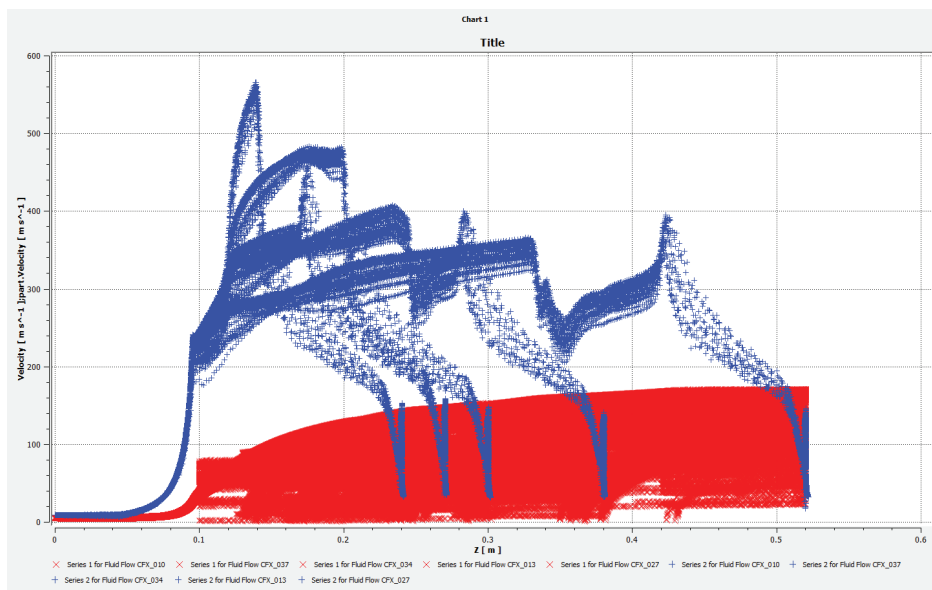


Рис. 14. Загальна картина зміни швидкості частинок дисперсної фази по довжині сопла Вентурі

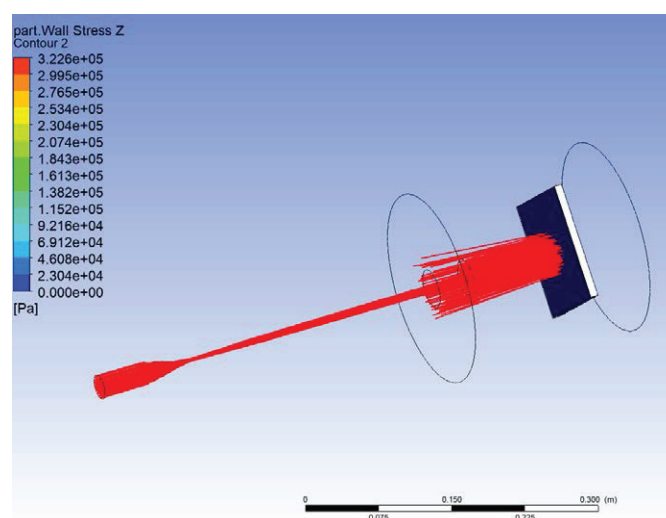


Рис. 15. Wall stress, Pa – контактні напруження на оброблювальній поверхні від удару піску

із поверненням в проточну частину сопла, після чого відбувається повторний розгін цих частинок.

В подальшому на базі отриманих результатів буде виконано дослідження впливу довжини

критичної частини сопла в широкому діапазоні його режимних параметрів. Для визначення кінетичної енергії піщинок необхідно проводити окремі дослідження.

Бібліографічні посилання:

1. 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*, Article. 70(4), 245–253. DOI:10.1134/S0040601523040018
2. Baha V., Pavlenko I., Židek K., Ciszak O. (2024). Ensuring the Abrasive Jet Machining Efficiency Using a Nozzle with a Perforated Insert. *Machines* 2024. Article. Basel: Switzerland. 12(5), 347. <https://doi.org/10.3390/machines12050347>.
3. Baha, V.; Mižáková, J.; Pavlenko, I. (2023). An Increase in the Energy Efficiency of Abrasive Jet Equipment Based on the Rational Choice of Nozzle Geometry. *Energies*, by the authors. Licensee MDPI, Article. Basel, Switzerland. 16, 6196. <https://doi.org/10.3390/en16176196>. © This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
4. Bañón, F.; Sambruno, A.; Batista, M.; Simonet, B.; Salguero, J. Surface. (2020). Quality and free energy evaluation of S275 steel by shot blasting, abrasive water jet texturing and laser surface texturing. *Metals*, 10(2), 290. DOI: 10.3390/met10020290
5. Bondarenko, G.; Baga, V.; Bashlak, I. (2014). Flow simulation in a labyrinth seal. *Applied Mechanics and Materials* 630, 234–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.630.234
6. Bondarenko, G.; Vanyeyev, S.; Baga, V.; Rodymchenko, T.; Bashlak, I. (2019). Increase of Efficiency of Turbine Setting Based on Study of Internal Flows. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 237–246. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_25
7. Fesenko, A.; Yevsiukova, F.; Basova, Y.; Ivanova, M.; Ivanov, V. (2018). Prospects of using hydrodynamic cavitation for enhancement of efficiency of fluid working medium preparation technologies. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 62(4), 269–276. DOI: 10.3311/PPme.11877
8. Han, X.; Xiao, J.; Yu, F.; Zhao, W. (2022). Relationships and mechanisms of sand grain promotion on nozzle cavitation flow evolution. A numerical simulation investigation. *Journal of Thermal Science* 31(6), 2385–2410. DOI: 10.1007/s11630-022-1568-y
9. 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* 47, 103089. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103089
10. Jianxin, D. (2005). Erosion wear of boron carbide ceramic nozzles by abrasive air-jets. *Materials Science and Engineering: A*, 408(1–2), 227–233. DOI: 10.1016/j.msea.2005.07.029
11. Jianxin, D.; Sun, J. (2008). Sand erosion performance of B 4 C based ceramic nozzles. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 26(3), 128–134. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2007.06.001
12. Kartal, V.; Emiroglu, M.E. (2023). Effect of nozzle type on local scour in water jets: An experimental study. *Ocean Engineering*, 277, 114323. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114323
13. Kondus, V., Pavlenko, I., Kulikov, O., & Liaposhchenko, O. (2023). Development of a High-Rotational Submersible Pump for Water Supply. *Water*: Article. Basel: Switzerland. 15(20), 3609. <https://doi.org/10.3390/w15203609>.
14. Korohodskiy V., Kryshtopa S., Migal V., Rogovyi A., Polivyanchuk A., Slyn'ko G., Manoylo V., Vasylenko O., Osetrov O. (2020). Determining the characteristics for the rational adjusting of a fuel-air mixture composition in a two-stroke engine with internal mixture formation. Article. P. 104.
15. Kosheleva, O.; Kreinovich, V. (1999). Error estimation for indirect measurements: interval computation problem is (slightly) harder than a similar probabilistic computational problem. *Reliable Computing* 5, 81–95. DOI: 10.1023/A:1026497709529
16. Kulikov, O., Ratushnyi, O., Moloshnyi, O., Ivchenko, O., & Pavlenko, I. (2022). Impact of the Closed, Semi-Opened, and Combined Contra-Rotating Stages on Volume Loss Characteristics. *Journal of Engineering Sciences*. Article. Sumy: Ukraine. 9(1), D6–D13. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).d2)
17. Kwon, D.-K.; Lee, J.-H. (2022). Performance improvement of micro-abrasive jet blasting process for al 6061. *Processes*, 10(11), 2247. DOI: 10.3390/pr10112247
18. 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*, Article. 37(5), 2139–2148. DOI:10.1007/s12206-023-2101-2
19. Lishchenko, N., Vanyeyev, S., Mižáková, J., Rodymchenko, T., Pitel', J. J. (2022). Numerical Simulation of Gas Flow Passing through Slots of Various Shapes in Labyrinth Seals. Article. Basel: *Energies* (in Switzerland). 15 (9), 2971 DOI:10.3390/en15092971
20. Pavlenko, I., Ciszak, O., Kondus, V., Ratushnyi, O., Ivchenko, O., Kolisnichenko, E., Kulikov, O., & Ivanov, V. (2023). An Increase in the Energy Efficiency of a New Design of Pumps for Nuclear Power Plants. *Energies*. Article. Basel: Switzerland. 16(6), 2929. <https://doi.org/10.3390/en16062929>
21. Povstyanoi, O.Y.; Sychuk, V.A.; McMillan, A.; Rud', V.D.; Zabolotnyi, O.V. (2015). Metallographic analysis and microstructural image processing of sandblasting nozzles produced by powder metallurgy methods. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 54(3-4), 234–240. DOI: 10.1007/s11106-015-9705-8

22. Rogovyi A., Khovanskyi S., Grechka I., Pitel J. (2020). The wall erosion in a vortex chamber supercharger due to pumping abrasive mediums. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II: Article. Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019Lutsk, Ukraine.* 682-691.
23. Rogovyi, S Khovanskyi, I Hrechka, A Gaydamaka. (2020) Studies of the swirling submerged flow through a confuser. *A. Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, Article.* p. 85-94.
24. Somov, D.; Zabolotnyi, O.; Polinkevich, R.; Valetskyi, B.; Sychuk, V. (2020). Experimental Vibrating Complex for the Research of Pressing Processes of Powder Materials. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham, pp. 321–329. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_32
25. Sychuk, V.; Zabolotnyi, O.; McMillan, A. (2015). Developing new design and investigating porous nozzles for abrasive jet machine. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 53(9-10), 600–605. DOI: 10.1007/s11106-015-9655-1
26. Sychuk, V.; Zabolotnyi, O.; Somov, D. (2018) Technology of Effective Abrasive Jet Machining of Parts Surfaces. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE. Lecture Notes in Mechanical Engineering 2019.* Springer, Cham, pp. 166–176. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_18.
27. Vanyeyev S.M., Bondarenko G. A., Baha V., Bashlak I. A., Rodymchenko T. S. (2018) Influence of Gas Physical Properties on Labyrinth Seals Throttling Characteristics. *Problems of the regional energetics.* Article. Chişinău, Institutul de Energetica: Moldova. 3 (38), 83-92.
28. 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* 280, 116778. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116778
29. Zabolotnyi, O.; Povstyanoy, O.; Somov, D.; Sychuk, V.; Svirzhevskyi, K. (2019). Technology of Obtaining Long-Length Powder Permeable Materials with Uniform Density Distributions. In: Beltran Jr., A., Lontoc, Z., Conde, B., Serfa Juan, R., Dizon, J., Springer, Cham.
30. Zabolotnyi, O.; Sychuk, V.; Somov, D. (2019). Obtaining of Porous Powder Materials by Radial Pressing Method. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer.

Baha V. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

The influence of geometrical and mode parameters on the efficiency of the working nozzle of the pneumatic abrasive ejector unit

The pneumatic abrasive unit has become widespread in a number of technological operations for processing surfaces of any form and contamination. The abrasive blasting method has been used for a long time due to its simplicity and efficiency. A large amount of compressed air is required for the operation of a pneumatic abrasive installation. Such installations are performed as a source of a compressed air compressor with a consumption of 0.35-5.25 cubic meters per minute, work that requires electricity consumption of the order of 25-40 kW. The main element of the air-abrasive installation, which affects the efficiency of its work and the amount of electricity consumption, is the working nozzle. Thus, the development of a more efficient design of the working nozzle in comparison with existing analogues will lead to a reduction in the consumption of expensive air and material processing time.

With the help of a numerical study using the ANSYS CFX 9 R1 complex, it was established that with an increase in the mass flow of sand, the mass flow of air decreases, which is due to the throughput of the nozzle itself. It was found that when the gas velocity decreases after a pressure jump, the velocity of sand grains does not decrease, but it almost does not increase either. It was also established that as the value of the pressure in front of the nozzle increases, the value of the speed of the grains of sand at the exit from the nozzle increases. As the diameter of the grains of sand decreases, the value of their speed increases at the same pressure and sand consumption.

The influence of the length of the diffuser part of the nozzle on the value of the velocity of the particles of the dispersed phase was studied. It was established that with an increase in the diffuser length of the nozzle, the value of the speed of sand grains increases almost three times in comparison with an industrial nozzle, which causes an increase in contact stresses on the processing surface from the impact of sand. The greater the value of the contact stresses, the more efficient the nozzle. The expediency of increasing the length of the diffuser part of the venturi nozzle compared to the industrial nozzle UDC32-450 has been experimentally confirmed. Thus, the processing time of a square meter of material with the length of the diffuser part of the nozzle $l=300$ mm decreased by 4 times.

Key words: pneumo-abrasive ejector unit, working nozzle, Venturi nozzle, geometric parameters, operating parameters, contact stresses, treated surface, upper ball, wear, nose resistance.