

БАРТКОВ МИКОЛА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-9206-365X>e-mail: nikiissport@gmail.com**КАРМАЛІТА АНАТОЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4397-2988>e-mail: akarmalita89@gmail.com**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ
ВАКУУМНИХ ЗАХВАТІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОЛОЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ВЗУТТЯ**

У статті наведено комплексні результати багатофакторних експериментальних досліджень процесу утримання плоских деталей крою взуття вакуумними захоплювачами мехатронних систем. Головною метою роботи є експериментальне визначення та наукове обґрунтування оптимальних геометричних параметрів присосок для надійного селективного сортування матеріалів із різною шорсткістю поверхонь. Дослідження проведено для дев'яти базових матеріалів взуттєвого виробництва (EVA, пористі та монолітні гуми, натуральна шкіра, штучне хутро, шкірзамінник). Фізичні дослідження реалізовані на спеціально розробленому автоматизованому стенді з двоконтурною мікропроцесорною архітектурою «Master-Slave», що дозволяє прецизійно фіксувати динаміку диференціального зусилля відриву. Синтезовано емпіричні математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії другого ступеня. Виконано розширений графоаналітичний аналіз 3D-поверхонь відгуку та їх двовимірних перерізів. Визначено раціональні параметри: зовнішній діаметр присоски доцільно фіксувати на рівні 40 мм, внутрішній — 25 мм, тоді як діаметр дроселя адаптивно варіюється від 1,0 мм до 3,0 мм залежно від макрорельєфу та повітропроникності матеріалу. Проведена верифікація підтвердила високу адекватність теоретичних моделей (відносна похибка становить 1,9–15,0%).

Ключові слова: вакуумний захват, деталі взуття, багатофакторний експеримент, оптимізація, мехатронна система, диференціальне зусилля, шорсткість поверхонь.

BARTKOV MYKOLA, KARMALITA ANATOLIY

Khmelnytskyi National University

**EXPERIMENTAL STUDY AND OPTIMIZATION OF VACUUM GRIPPER PARAMETERS
FOR POSITION CONTROL OF FOOTWEAR PARTS**

The full-scale automation of modern footwear production requires highly reliable mechatronic systems capable of manipulating flexible flat parts with asymmetric surface roughness and variable porosity. This article presents the comprehensive results of multifactorial experimental studies on the retention process of flat footwear parts using automated vacuum grippers. The primary objective of the research is to determine the optimal geometric parameters of vacuum suction cups to ensure reliable selective sorting and spatial reorientation of materials based purely on their physical and mechanical characteristics. The experimental methodology utilized a second-order non-composite design (a subset of the 3^k plan type). The physical experiments were successfully conducted using a specially designed and manufactured automated mechatronic test bench with a dual-circuit "Master-Slave" microprocessor control architecture. This setup enabled precise, synchronous registration of the differential holding force and vacuum pressure dynamics at the exact microsecond of contact rupture without any software delays. The comprehensive study encompassed nine fundamental materials widely used in the modern footwear industry: EVA, two types of porous rubber, monolithic rubber, molded rubber outsoles with a ribbed tread, natural bottom leather, natural upper leather, artificial fur, and artificial leatherette. Based on the obtained experimental data arrays, robust empirical mathematical models were synthesized in the form of second-degree polynomial regression equations for each specific material type. The statistical significance of the coefficients and the overall adequacy of the models were strictly confirmed using both Student's and Fisher's statistical criteria. A detailed grapho-analytical analysis of the 3D response surfaces and their two-dimensional cross-sections in natural physical coordinates was thoroughly performed. The global extrema of the response function were analytically calculated, leading to the determination of rational design parameters for the vacuum grippers. The empirical results clearly indicate that to maximize the differential holding force, the external diameter of the suction cup should be fixed at the upper limit (40 mm) and the internal diameter at 25 mm across all tested materials to cover surface anomalies. However, the optimal diameter of the throttling orifice is highly variable and depends strictly on the material's air permeability and macro-relief: 1.0 mm for highly porous rubbers to resist atmospheric air inflow, 2.0 mm for smooth solid structures like EVA, and 3.0 mm for materials with significant rough layers like natural leather and artificial fur to prevent excessive elastic deformation into the vacuum chamber. Furthermore, the developed theoretical analytical model was rigorously verified against the experimental regression models. The comparative analysis demonstrated a remarkably high degree of convergence, with the average relative error ranging from 1.9% for thin upper leathers to 3.9% for elastically deformable materials like EVA. The highest discrepancy (15.0%) was logically observed in bottom leather due to the complex, non-uniform morphological structure of its flesh side (corium). The obtained mathematical models and optimized geometric parameters form a solid, validated engineering foundation for designing advanced adaptive vacuum gripping devices perfectly integrated into automated footwear manufacturing robotic systems. This approach allows for a completely flawless successful reorientation of footwear parts without the need for complex computer vision systems.

Keywords: vacuum gripper, footwear parts, multifactorial experiment, optimization, mechatronic system, differential force.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.08.2026

Прийнята до друку / Accepted 24.09.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бартков Микола, Кармаліта Анатолій

Постановка проблеми у загальному вигляді**та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

У сучасному виробництві взуття та виробів легкої промисловості стрімко зростає потреба у впровадженні високопродуктивних гнучких роботизованих комплексів [1]. Однією з найскладніших наукоємних

проблем автоматизації залишається процес надійного захоплення, транспортування та точного позиціонування плоских деталей крою. Головна технологічна складність маніпулювання такими деталями полягає у специфічних фізико-механічних властивостях їхніх матеріалів: вони є нежорсткими, легкодеформівними і, що найважливіше, характеризуються суттєвою морфологічною асиметрією протилежних поверхонь. Як правило, одна сторона деталі є лицьовою (відносно гладкою), а протилежна — виворітною (бахтармяною, ворсистю або макропористою) [2].

Забезпечення безпомилкового сортування та переорієнтації таких деталей у просторі без залучення дорогих систем машинного зору вимагає створення адаптивних вакуумних захватних пристроїв. Для їх ефективного функціонування необхідно чітко розуміти процеси, що протікають у мікрозазорах між ущільнювальною юбкою присоски та шорсткою поверхнею матеріалу, та вміти оптимізувати конструктивні параметри захватів під кожну конкретну групу матеріалів.

Аналіз досліджень та публікацій

Фундаментальні дослідження з розв'язання задач автоматичного орієнтування плоских деталей за геометричними та фізичними ознаками виконувалися багатьма вченими [3, 4]. Розробці методів роботизації у взуттєвій галузі присвячені ґрунтовні роботи зарубіжних дослідників, зокрема Choi H.-S. та ін. [1], які досліджували створення роботизованих маніпуляторів. Проте класичні механічні та традиційні пневматичні системи часто не здатні забезпечити стабільний контроль положення деталей зі складним поверхневим рельєфом. Як доведено у попередніх роботах авторів [5, 6, 7], інтенсивне підсмоктування атмосферного повітря крізь мікропори матеріалу або через умовний зазор, утворений ворсом, призводить до стрімкого вирівнювання тисків та втрати вакууму. Незважаючи на наявність загальних теоретичних викладок, комплексні експериментальні дослідження, які б пов'язували геометричні параметри присосок (діаметри камери та дроселів) із результируючим диференціальним зусиллям відриву для широкого спектра взуттєвих матеріалів, досі не були систематизовані. Це стримує впровадження розроблених методів [5] у реальне виробництво.

Формулювання цілей статті

Метою даного дослідження є побудова адекватних емпіричних математичних моделей процесу вибіркового утримання плоских деталей крою взуття вакуумними захватами та експериментальне визначення їх оптимальних конструктивно-технологічних параметрів для забезпечення максимального диференціального зусилля під час автоматизованої просторової переорієнтації.

Виклад основного матеріалу

1. Методики проведення експериментальних досліджень

Для фізичного моделювання складних швидкоплинних динамічних процесів контактної взаємодії вакуумних присосок із деталями, що мають відмінну шорсткість протилежних поверхонь, було спроектовано та виготовлено прецизійний автоматизований мехатронний стенд. Стенд забезпечує точну синхронну реєстрацію зусиль відриву та перепадів тиску в реальному часі безпосередньо в момент відведення присосок від поверхонь деталі [8].

Основна конструктивна ідея роботи стенда полягає у фізичному відтворенні «змагання» двох протилежно розташованих присосок. Об'єкт маніпулювання затискається між зустрічно спрямованими вакуумними захоплювачами, які після комутації розрідження синхронно розводяться у протилежні сторони. Деталь залишається на тій присосці, де сила присмоктування є вищою (тобто на стороні з меншим коефіцієнтом шорсткості та вищою герметичністю умовного зазору).

Для забезпечення безпрецедентної метрологічної точності апаратну архітектуру стенда було розподілено на два незалежні контури за топологією «Master-Slave» (Ведучий-Ведений). Логічний контур (Master на базі мікроконтролера Arduino Mega 2560) відповідає за жорстке генерування профілів швидкості для крокових двигунів NEMA 23 та комутацію електромагнітних клапанів [9]. Вимірювальний контур (Slave на базі Arduino Uno R3), оснащений 24-бітним АЦП HX711 та прецизійними п'єзореzystивними датчиками тиску XGZP6847A, працює як високошвидкісний реєстратор (із частотою дискретизації 10 Гц), передаючи цифрові масиви даних у спеціалізоване ПЗ, написане мовою Python.

Для побудови математичної моделі процесу застосовано планування багатофакторного експерименту з використанням некомпозиційних планів другого порядку (вибірка з плану типу 3^k) [10,11], де число факторів $k = 3$, кількість рівнів $p = 3$, загальна кількість дослідів $N = 15$ для одного матеріалу. Змінними факторами виступали:

- x_1 — діаметр отвору дроселювання $d_{др}$ (від 1,0 до 3,0 мм);
- x_2 — внутрішній діаметр присоски d_0 (від 15,0 до 25,0 мм);
- x_3 — зовнішній діаметр присоски d_a (від 30,0 до 40,0 мм).

Функцією відгуку обрано диференціальне зусилля утримання ΔN (Н), зафіксоване тензодатчиком у мікросекунду розриву контакту. Дослідження проводилися для 9 базових матеріалів: EVA, натуральна шкіра (низу та верху), штучний шкірзамінник, штучне хутро, пориста гума (№1, №2), монолітна гума та формовані гумові підмітки.

Таблиця 1.

Результати експериментальних вимірювань диференціального зусилля утримання ΔN для різних матеріалів взуття

№ досліду (присоски)	ΔN експериментальне (Н)								
	EVA	Шкіра для низу взуття	Шкір заміник	Шкіра для верху взуття	Штучне хутро	Гума пориста №1	Гума пориста №2	Монолітна гума для підшов	Формовані гумові підшви з рифленням ходової поверхні
1	29,73	8,7	4,52	21,41	30,32	24,95	23,54	32,43	30,53
2	21,94	2,67	1,25	12,40	20,23	10,68	13,61	20,03	17,41
3	33,33	10,36	1,13	1,03	3,39	31,81	29,26	33,82	32,17
4	22,02	10,61	1,54	2,12	5,78	18,78	21,71	22,26	21,83
5	24,27	12,54	4,74	12,35	20,68	21,69	24,92	23,80	26,74
6	28,22	5,4	3,10	20,27	28,48	17,19	24,61	26,16	27,17
7	22,39	4,28	2,33	14,16	21,78	14,88	15,63	22,84	19,43
8	28,75	14,79	1,56	1,65	5,42	32,06	31,11	27,50	29,10
9	22,66	10,39	1,08	1,18	3,35	22,85	22,45	22,92	20,58
10	21,21	7,57	3,17	10,82	16,74	17,83	19,43	20,76	20,39
11	38,86	19,69	6,63	12,43	26,26	35,38	37,17	33,70	37,56
12	29,70	15,57	5,34	9,68	18,29	23,56	27,72	25,12	25,11
13	25,68	8,75	4,22	14,05	19,35	19,25	20,31	25,15	22,39
14	16,11	7,43	3,09	10,12	13,08	13,31	14,45	17,65	17,18
15	22,98	13,86	4,69	12,46	17,45	24,84	25,88	27,45	23,86

2. Математичне моделювання та аналіз поверхонь відгуку

Усереднені результати натурних випробувань (по 3 повторення для кожної точки плану) дозволили розрахувати коефіцієнти поліноміальних рівнянь регресії другого порядку. Статистичне оцінювання значущості коефіцієнтів виконувалося за критерієм Стюдента, а адекватність моделей — за F-критерієм Фішера [10,11].

Для наочної інженерної інтерпретації застосовано метод графоаналітичного аналізу просторових поверхонь відгуку (3D) та їхніх двовимірних перерізів у натуральних координатах.

Група матеріалів (EVA).

Декодоване рівняння регресії для матеріалу EVA має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta N_{EVA} = & 22,820 - 0,560 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) + 5,734 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 3,831 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 0,880 \cdot \\ & \cdot \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) - 0,065 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 0,102 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + \\ & + 0,926 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 3,009 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 1,759 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Аналіз геометрії отриманої поверхні показує, що для EVA домінуючий позитивний вплив на цільову функцію мають лінійні розміри присоски. Збільшення робочих діаметрів ($x_2 \rightarrow +1, x_3 \rightarrow +1$) максимізує площу розрідження на гладкій стороні деталі. Найбільше значення диференціального зусилля зафіксоване в точці екстремуму $d_{0_opt} = 25$ мм та $d_{a_opt} = 40$ мм і становить $\Delta N_{max} = 38,86$ Н. Вплив дроселювання є мінімальним, що дозволяє використовувати середній прохідний отвір (2,0 мм).

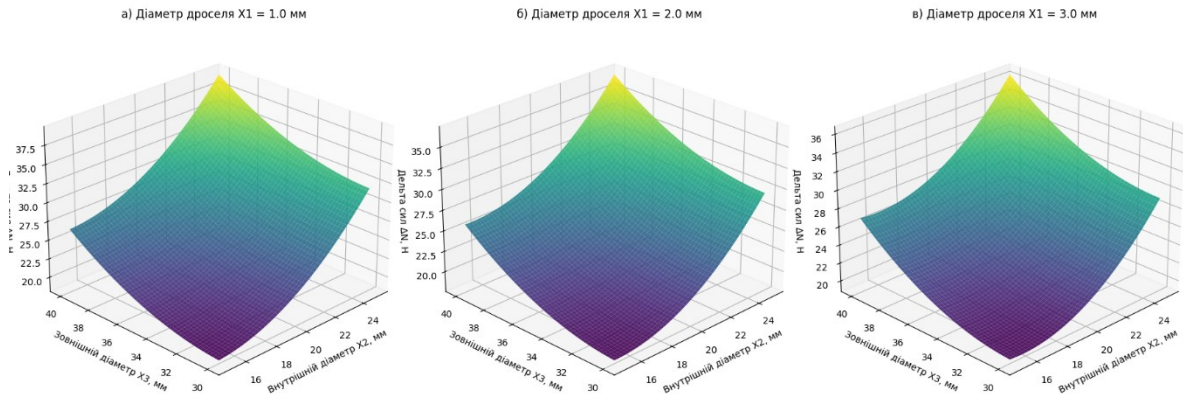


Рис.1. Просторова поверхня відгуку (а) та її двовимірні ізолінії (б) залежності зусилля ΔN від внутрішнього діаметра d_0 (X_2) та зовнішнього діаметра d_a (X_3) для матеріалу EVA

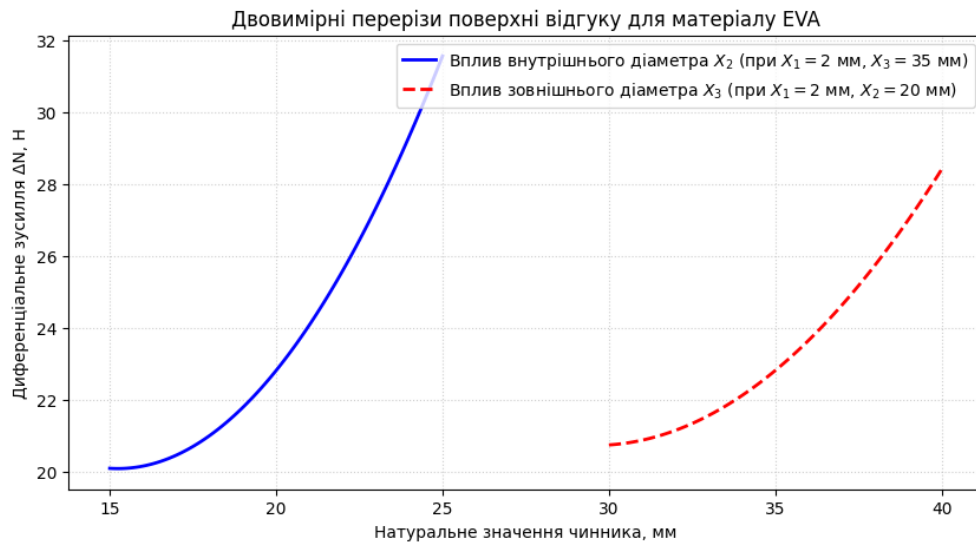


Рис.2. Двовимірні перерізи поверхні відгуку для матеріалу EVA

Група матеріалів із високою пористістю та макрошорсткістю (Гума пориста №1, №2).

Декодоване рівняння регресії для матеріалу гума пориста №1 та гума пориста №2 має вигляд:

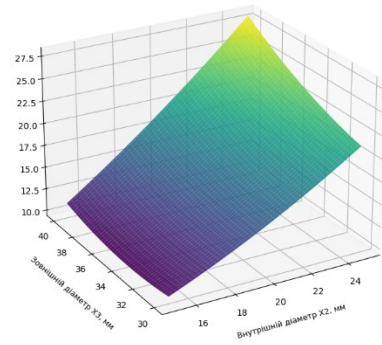
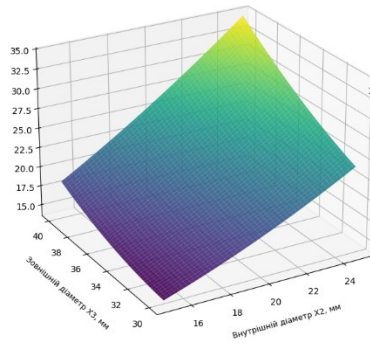
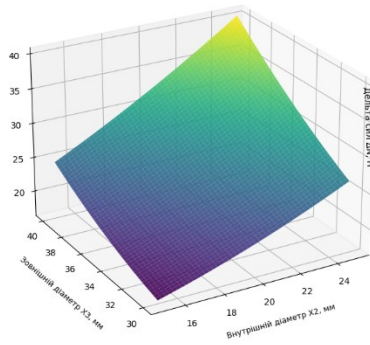
$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{гума_пор1}} = & 21,453 - 4,725 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 6,710 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 3,660 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + \\ & + 0,310 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) - 1,725 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 1,470 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 0,514 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 0,616 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 0,806 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{гума_пор2}} = & 23,410 - 3,392 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 5,951 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 4,119 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,595 \cdot \\ & \cdot \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 0,080 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,897 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - \\ & - 1,421 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 0,041 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 1,461 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

а) Діаметр дроселя $X_1 = 1.0$ мм

б) Діаметр дроселя $X_1 = 2.0$ мм

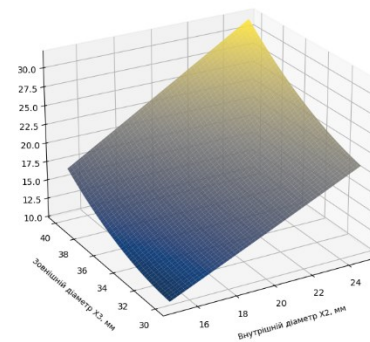
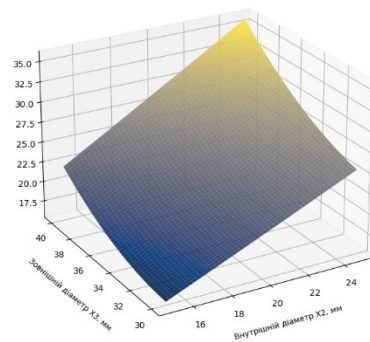
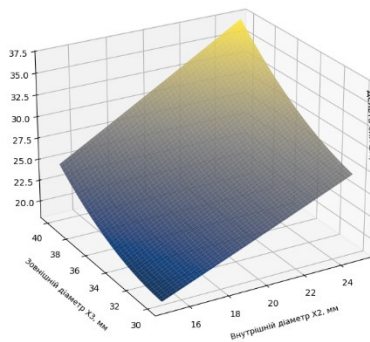
в) Діаметр дроселя $X_1 = 3.0$ мм



а) Діаметр дроселя $X_1 = 1.0$ мм

б) Діаметр дроселя $X_1 = 2.0$ мм

в) Діаметр дроселя $X_1 = 3.0$ мм



б)

Рис.3. Просторові поверхні відгуку взаємодії чинників дроселювання $d_{др}$ (X_1) та внутрішнього діаметра d_0 (X_2) для матеріалу «Гума пориста №1» (а) та «Гума пориста №2» (б).

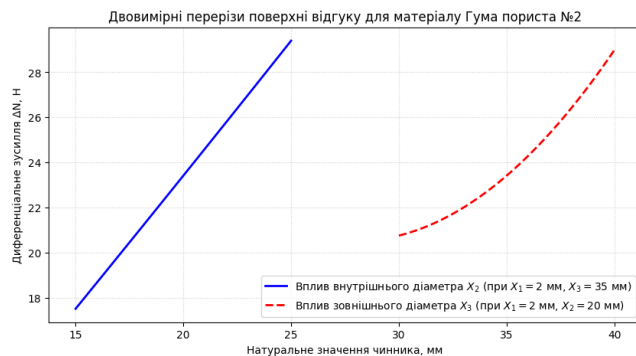
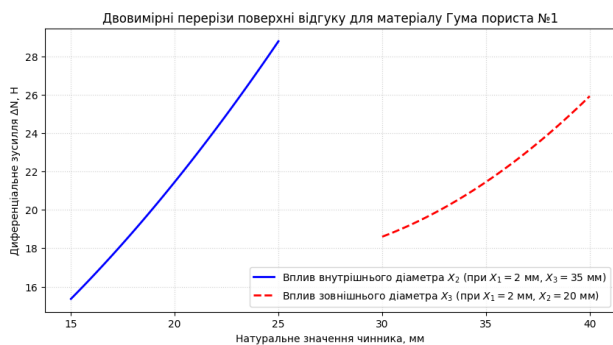


Рис. 4. Двовимірні перерізи поверхні відгуку для матеріалу гума пориста №1(а), гума пориста №2 (б).

Для пористих гумових деталей характер поверхні відгуку кардинально змінюється. Вона чітко візуалізує наявність крутого спаду цільової сили утримання при збільшенні отвору дроселювання ($x_1 \rightarrow +1$). Атмосферне повітря інтенсивно надходить з периферії крізь умовний поверхневий зазор та пори. Якщо отвір дроселя великий, пневматична система не встигає компенсувати це надходження, тиски вирівнюються, і результуюча дельта сил прямує до критичного мінімуму. Глобальний екстремум лежить у зоні мінімального отвору дроселювання ($d_{др} = 1,0$ мм), що створює гідродинамічний опір паразитним притокам.

Група монолітних та формованих матеріалів (Монолітна гума, Формовані підмітки з рифленням).

Декодоване рівняння регресії для матеріалу монолітна гума для підшов та формовані гумові підшви з рифленням ходової поверхні має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{мон-гума}} = & 24,003 - 0,630 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) + 4,998 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 2,997 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,210 \cdot \\ & \cdot \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) - 0,315 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,270 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + \\ & + 1,291 \left(\frac{d_{др} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 1,841 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 - 0,439 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta N_{\text{риф-гума}} = 23,660 - 1,141 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 5,821 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 4,240 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,693 \cdot \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) - 0,200 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 1,810 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,169 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 1,654 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 0,236 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \quad (5)$$

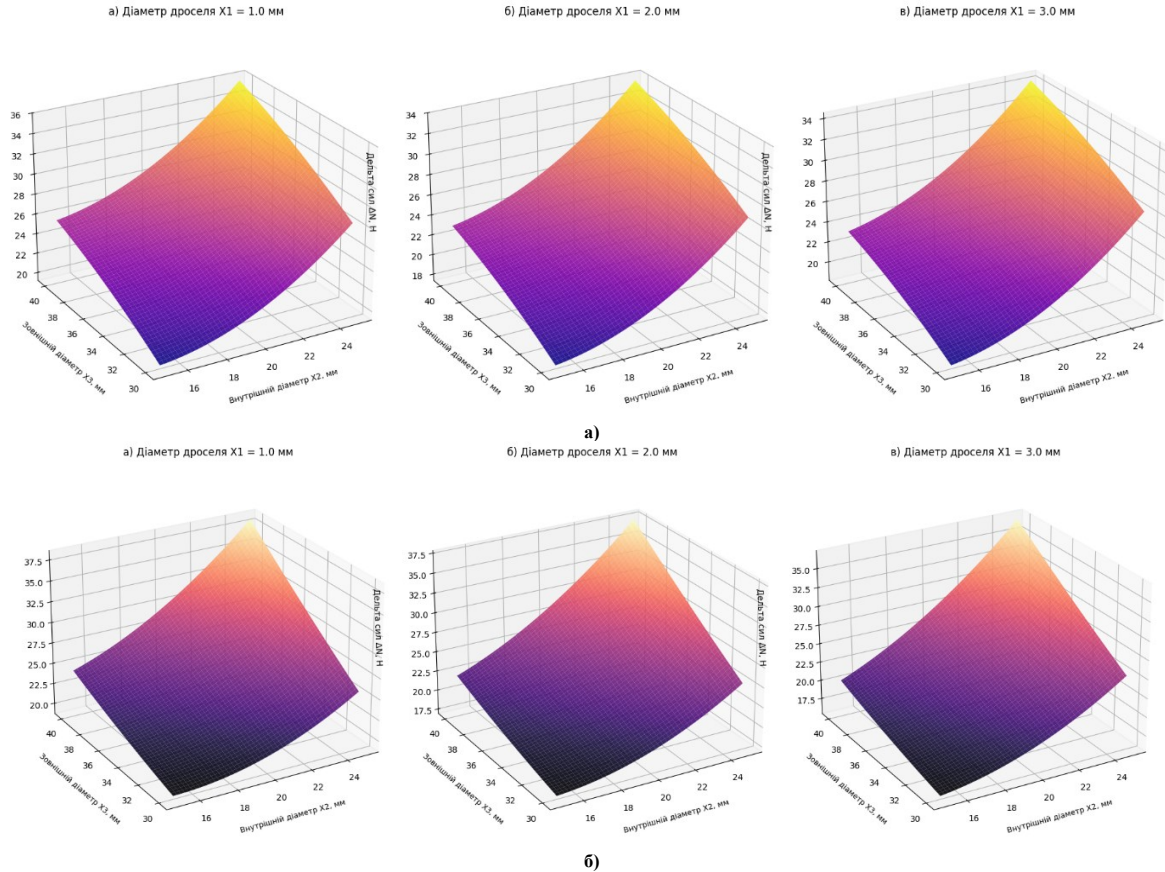


Рис.5. Просторові поверхні взаємодії внутрішнього d_0 (X_2) та зовнішнього d_a (X_3) діаметрів присосок для монолітної гуми (а) та формованих рифлених підміток (б)

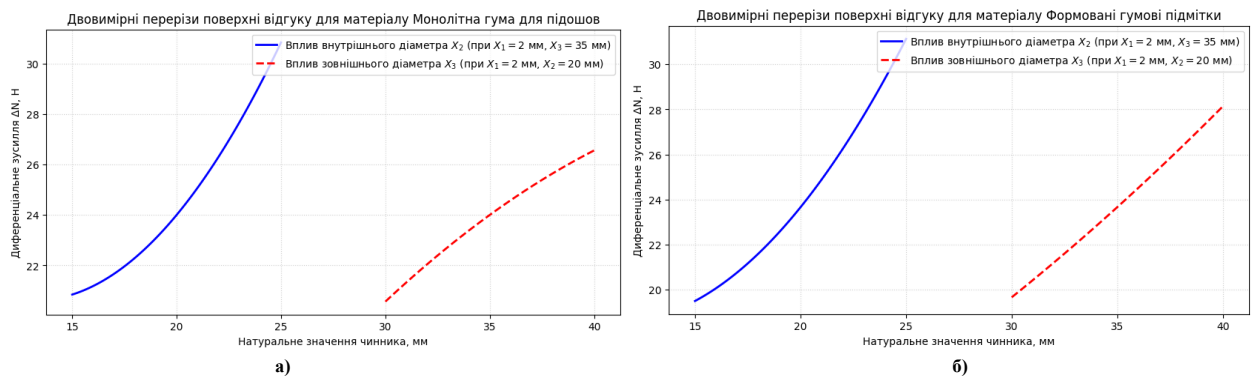


Рис.6. Двовимірні перерізи поверхні відгуку для матеріалу монолітна гума для підшов(а) та формовані гумові підмітки (б)

Для формованих підміток із рифленням графоаналітичний аналіз фіксує виражену скрученість поверхні зумовлену сильним крос-взаємозв'язком чинників $b_{23} = 1,810$. Якщо збільшувати внутрішній діаметр d_0 без відповідного розширення ущільнювального пояса d_a , зусилля стрімко падає через прорив повітря крізь макроканали рифлення. Оптимальна робоча точка вимагає використання присосок із максимально широким пояском ($d_a = 40$ мм), який деформаційно заповнює мікрорельєф.

Група матеріалів із природною асиметрією (Натуральна шкіра низу та верху).

Декодоване рівняння регресії для шкіри низу та верху має вигляд:

$$\Delta N_{\text{шкіра_низу}} = 11,323 - 3,137 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 3,107 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 1,307 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 1,569 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) - 0,819 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,700 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \cdot \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 3,691 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 0,753 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 1,083 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \quad (6)$$

$$\Delta N_{\text{шкіра_верху}} = 11,877 + 7,782 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 0,733 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 1,658 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 2,525 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 1,410 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 0,295 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \cdot \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 2,446 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 - 0,191 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 - 0,116 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \quad (7)$$

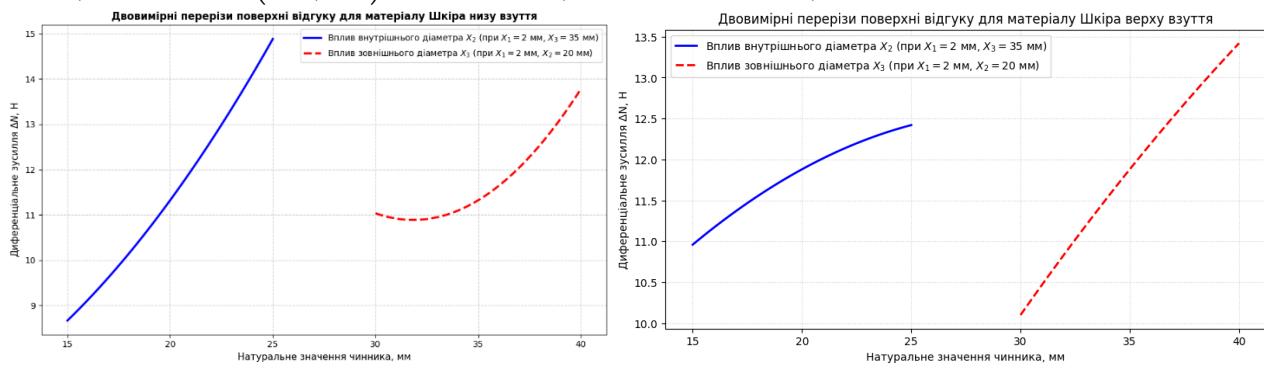


Рис.7. Двовимірні перерізи поверхні відгуку для матеріалу шкіра для низу взуття (а) та шкіра верху взуття (б)

а) Діаметр дроселя $X_1 = 1.0$ мм

б) Діаметр дроселя $X_1 = 2.0$ мм

в) Діаметр дроселя $X_1 = 3.0$ мм

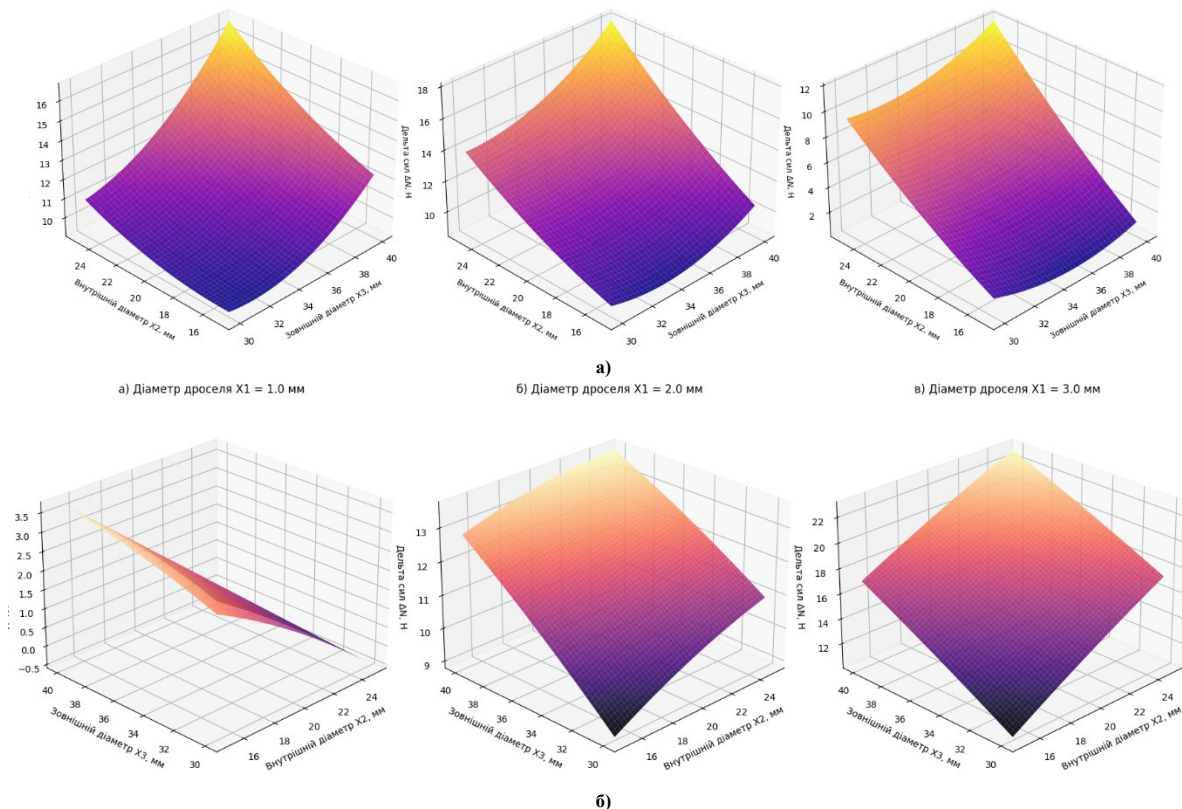


Рис.8. Просторові поверхні відгуку взаємодії чинників дроселювання $d_{\text{др}}$ (X_1) та внутрішнього діаметра d_0 (X_2) для матеріалу «Натуральна шкіра для низу взуття» (а) та «Натуральна шкіра для верху взуття» (б).

Аналіз свідчить про унікальну поведінку натуральних шкір. Для шкіри низу характерний надзвичайно сильний позитивний лінійний вплив чинника дроселювання ($b_1 = 8,599$). Оскільки груба бахтармяна поверхня утворює значний зазор, необхідно забезпечити максимальну пропускну здатність системи (відкрити дросель до 3,0 мм), щоб встигати відкачувати паразитне повітря і дати можливість лицьовій стороні «перемогти» у силовому

змаганні. Збільшення внутрішнього діаметра d_0 має вигляд опуклої параболи: надмірне розширення камери (понад 20 мм) призводить до втягування жорсткої бахтарми і розкриття мікроканалів витоків, що знижує зусилля.

Група синтетичних ворсових та гладких матеріалів (Штучне хутро, Шкірзамінник).

Декодоване рівняння регресії для штучне хутро та шкірзамінник має вигляд:

$$\Delta N_{\text{хутро}} = 18,290 + 10,359 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 2,478 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 2,876 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 3,120 \cdot \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 1,157 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,425 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 3,924 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 0,564 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 0,391 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \quad (8)$$

$$\Delta N_{\text{шкірзам}} = 4,200 + 0,736 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) + 0,940 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 0,459 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,920 \cdot \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) + 0,073 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) + 0,040 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right) \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right) - 2,446 \left(\frac{d_{\text{др}} - 2,0}{1,0} \right)^2 + 0,356 \left(\frac{d_0 - 20,0}{5,0} \right)^2 + 0,264 \left(\frac{d_a - 35,0}{5,0} \right)^2 \quad (9)$$

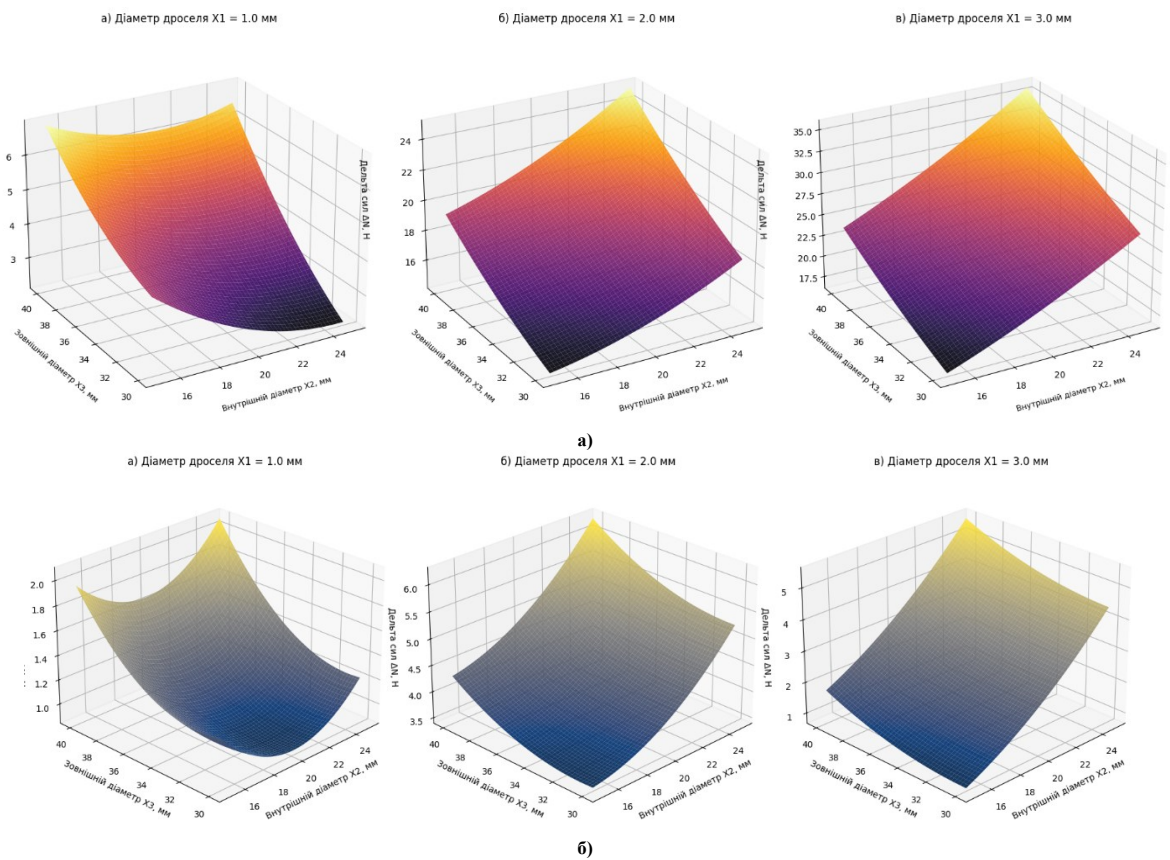


Рис.9. Просторові поверхні взаємодії чинників для матеріалу «Штучне хутро» (а) та «Шкірзамінник» (б).

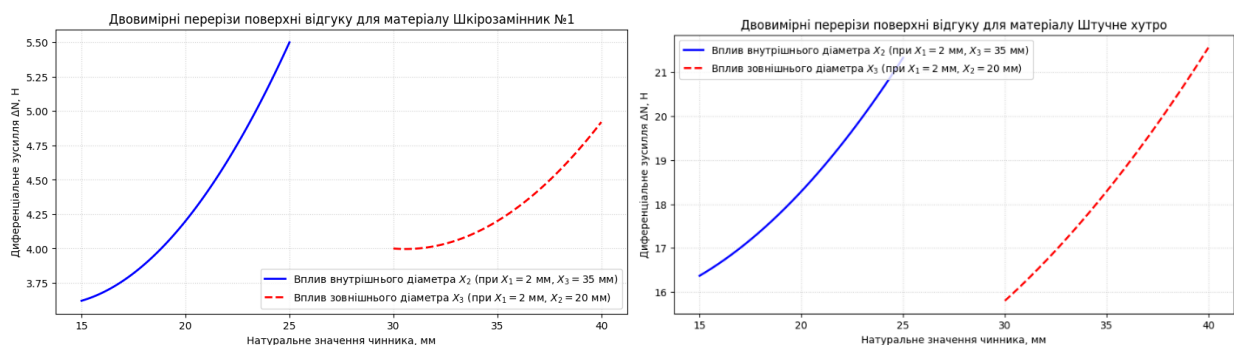


Рис. 10. Двовимірні перерізи поверхні відгуку для матеріалу шкірзамінник (а), штучне хутро (б).

Для штучного хутра наявність довгого ворсу створює відкриті канали. Максимум функції досягається при сумісному розширенні зовнішнього діаметра та максимальному дроселюванні ($d_{др} = 3,0$ мм). Для шкірзамінника дельта сил має низьку амплітуду (до 6,63 Н), проте цього абсолютно достатньо для надійного переорієнтування легких синтетичних деталей, що підтверджує високу чутливість запропонованого методу.

3. Оптимізація параметрів присосок та верифікація моделі

На основі диференціювання рівнянь регресії розраховано глобальні екстремуми. Зведені оптимальні параметри вакуумних присосок, які гарантують безпомилкове сортування, наведені у таблиці 2.

Для підтвердження адекватності математичної моделі, описаної авторами раніше [5, 6], проведено порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними значеннями (за рівняннями регресії).

Таблиця 2

Оптимальні геометричні параметри вакуумних присосок для різних груп матеріалів деталей взуття

№ п/п	Назва дослідних матеріалів деталей крою	$d_{др_опт}$ (мм)	$d_{0_опт}$ (мм)	$d_{a_опт}$ (мм)	ΔN_{max} (Н)
1	EVA	2,0...3,0	25	40	38,86
2	Гума пориста №1	1	25	40	35,38
3	Гума пориста №2	1	25	40	37,17
4	Монолітна гума для підошов	2	25	40	33,82
5	Формовані гумові підмітки	2	25	40	37,56
6	Натуральна шкіра для низу	3	25	40	21,26
7	Натуральна шкіра для верху	3	25	40	14,16
8	Штучне хутро	3	25	40	28,48
9	Шкірзамінник	2	25	40	6,63

Верифікація математичної моделі: порівняння теорії та розрахунку за регресією
(Сталі критерії: $d_0 = 25$ мм, $d_a = 40$ мм, $d_{др}$ — оптимальний)

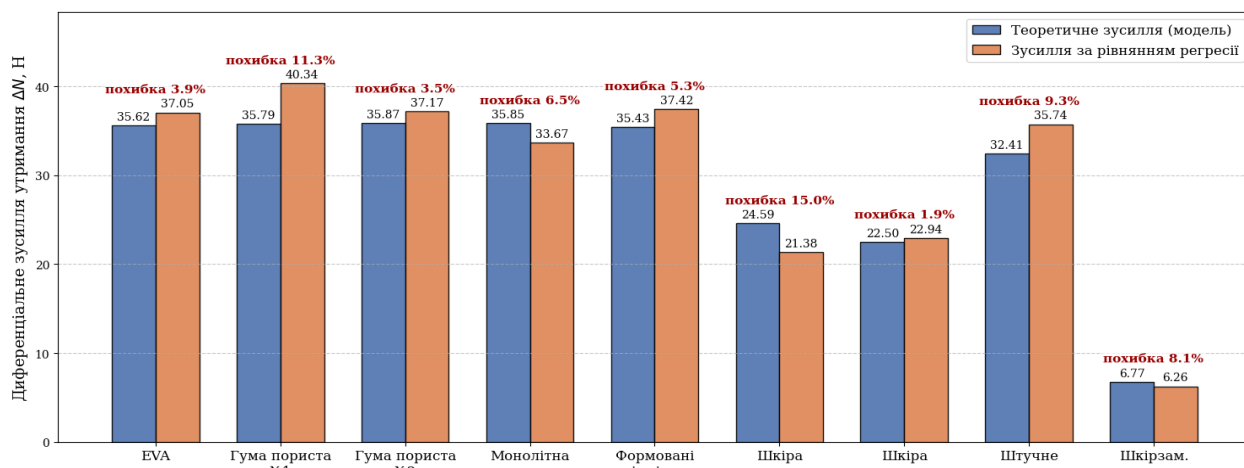


Рис.11. Верифікація математичної моделі: порівняння теоретичного розрахунку та експериментальних даних за рівняннями регресії ($d_0 = 25$ мм, $d_a = 40$ мм).

Аналіз гістограми та динамічних графіків верифікації свідчить про високу достовірність теоретичної бази. Для більшості матеріалів зі стабільною структурою (шкіра верху, EVA, гуми) відносна похибка не перевищує 1,9–9,3%. Найвища розбіжність (15,0%) отримана для шкіри низу взуття, що закономірно для експериментальної механіки контактної взаємодії біологічних матеріалів зі складною, неоднорідною морфологією бахтарми.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. На основі розробленого апаратно-програмного комплексу успішно реалізовано методику багаточинного планування експерименту, що дозволило дослідити комплексний вплив конструктивних параметрів присоски ($d_{др}$, d_0 , d_a) на величину диференціального зусилля утримання деталей ΔN .

2. Синтезовано емпіричні математичні моделі у вигляді поліномів другого ступеня для 9 типових матеріалів взуттєвого виробництва.

3. Встановлено що для гарантованого перекриття поверхневих нерівностей зовнішній діаметр присоски (d_a) доцільно фіксувати на верхньому рівні (40 мм), а внутрішній (d_0) - на рівні 25 мм.

4. Доведено, що калібрований отвір дроселювання виступає головним адаптивним фактором керування: для мікропористих гум його необхідно зменшувати до 1,0 мм, для EVA - встановлювати на рівні 2,0 мм, а для

натуральної шкіри, хутра - максимально збільшувати до 3,0 мм.

5. Проведена верифікація підтвердила високий ступінь збіжності теоретичної газодинамічної моделі з результатами експерименту (середня відносна похибка в межах 2,7–9,3%).

6. Встановлено технологічні межі застосовності: для матеріалів зі складною морфологією (шкіра низу) збільшення камери розрізання веде до деформації бахтарми та падіння зусилля, що може призвести до неможливості контролю.

7. Отримані результати є повністю придатними для інтеграції в алгоритми промислових контролерів систем автоматизованого керування вакуумними захоплювачами у гнучких роботизованих лініях.

Література

1. Choi H.-S., Hwang G.-D., You S.-S. Development of a new buffing robot manipulator for shoes. *Robotica*. 2008. Vol. 26, No. 1. P. 55–62.
2. Кармаліта А. К., Пундик С. І. Способи контролю положення плоских деталей взуття за асиметрією властивостей поверхонь. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 1 (18). С. 50–59.
3. Семеніхіна Л. Ф. Контроль положення деталей за властивостями поверхонь : дис. ... канд. техн. наук. Київ, 1972. 208 с.
4. Пундик С. І., Кармаліта А. К. Проектування засобів організації середовища для промислових роботів. *IX Україно-Польські наукові діалоги* : тези доп. 9-ї Міжнар. наук. конф., 20–23 жовт. 2021 р. Хмельницький, 2021. С. 143–145.
5. Бартков М. С., Кармаліта А. К. Дослідження контролю положення плоских деталей взуття за властивостями поверхонь з допомогою присосок. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2026. № 367. С. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-9>.
6. Кармаліта А. К., Бартков М. С., Пундик С. І. Дослідження процесу взаємодії вакуумного захвату з поверхнями різної шорсткості. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. № 1 (347). С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-13>.
7. Пундик С. І. Обґрунтування конструкційних параметрів пристроїв для контролю положення плоских деталей низу взуття в автоматизованих процесах обробки : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.10. Київ, 2021. 185 с.
8. Бартков М. С. Розробка та конструкторсько-технологічні особливості автоматизованого стенда для дослідження вакуумних захоплювальних систем. *Перспективні технології та прилади* : зб. наук. праць. Луцьк, 2026. Вип. 28. С. 19–23. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-3>.
9. Технічні засоби автоматизації. Математичні операції на пневматичних елементах та їх використання в системі керування : навч. посіб. / уклад. П. М. Сташкевич, М. В. Лукінюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 319 с.
10. Лапач С. М. Теорія планування експерименту: виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс]. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.
11. Поворознюк А. І., Панченко В. І., Філатова А. Е. Методологія та організація наукових досліджень : навч. посіб. Харків : НТМТ, 2016. 192 с.

References

1. Choi, H.-S., Hwang, G.-D., & You, S.-S. (2008). Development of a new buffing robot manipulator for shoes. *Robotica*, 26(1), 55-62.
2. Karmalita, A. K., & Pundyk, S. I. (2024). Sposoby kontroliu polozhennia ploskykh detalei vzuttia za asymetriieiu vlastyvostei poverkhon [Methods of position control of flat footwear parts by asymmetry of surface properties]. *Tekhnologii ta inzhynirynh*, 1(18), 50-59.
3. Semenikhina, L. F. (1972). *Kontrol polozhennia detalei za vlastyvostiamy poverkhon* [Position control of parts by surface properties] (PhD Dissertation). Kyiv.
4. Pundyk, S. I., & Karmalita, A. K. (2021). Proektuvannia zasobiv orhanizatsii seredovysycha dlia promyslovykh robotiv [Designing tools for organizing the environment for industrial robots]. In *IX Ukraino-Polski naukovy dialogy* (pp. 143-145). Khmelnytskyi.
5. Bartkov, M. S., & Karmalita, A. K. (2026). Doslidzhennia kontroliu polozhennia ploskykh detalei vzuttia za vlastyvostiamy poverkhon z dopomohoiu prysosok [Research of the position control of flat shoe parts by surface properties using suction cups]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky*, (367), 59-65. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-9>
6. Karmalita, A. K., Bartkov, M. S., & Pundyk, S. I. (2025). Doslidzhennia protsesu vzaiemodii vakuumnogo zakhvatu z poverkhniamy riznoi shorstkosti [Investigation of the interaction process of vacuum gripper with surfaces of different roughness]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, 1(347), 13-19. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-13>
7. Pundyk, S. I. (2021). *Obgruntuvannia konstruktivnykh parametriv prystroiv dlia kontroliu polozhennia ploskykh detalei nyzu vzuttia v avtomatyzovanykh protsesakh obrobky* [Substantiation of design parameters of devices for position control of flat footwear bottom parts in automated processing operations] (PhD Dissertation). Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv.
8. Bartkov, M. S. (2026). Rozrobka ta konstruktorsko-tekhnologichni osoblyvosti avtomatyzovanoho stenda dlia doslidzhennia vakuumnykh zakhopliuvalnykh system [Development and design-technological features of an automated test bench for researching vacuum gripping systems]. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady*, (28), 19-23. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-3>
9. Stashkevych, P. M., & Lukiniuk, M. V. (Comps.). (2019). *Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii. Matematychni operatsii na pnevmatychnykh elementakh ta yikh vykorystannia v systemy keruvannia* [Technical automation tools. Mathematical operations on pneumatic elements and their use in control systems]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
10. Lapach, S. M. (2020). *Teoriia planuvannia eksperymentu: vykonannia rozrakhunkovo-hrafichnoi roboty* [Theory of experiment planning: performing calculation and graphic work]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
11. Povoroznyuk, A. I., Panchenko, V. I., & Filatova, A. E. (2016). *Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzen* [Methodology and organization of scientific research]. Kharkiv: NTMT.