

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-10>

УДК 677.017:004.94:678.7

МИЦА ВІКТОРІЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5453-9787>

e-mail: mitsa_vv@ukr.net

РЯБЧИКОВ МИКОЛА

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9382-7562>

e-mail: mykola.riabchykov@lntu.edu.ua

СТВОРЕННЯ ВІТРОЗАХИСНИХ МЕТАТЕКСТИЛЬНИХ СТРУКТУР МЕТОДАМИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті розглянуто перспективи створення вітрозахисних метатекстильних структур методами адитивного виробництва. Обґрунтовано використання просторових комірчастих структур, сформованих із повторюваних вузлових елементів та криволінійних з'єднувальних ланок, для керування проходженням повітряного потоку. Визначено вплив структури просторової геометрії на їхні аеродинамічні характеристики. Для дослідження вітропроникнення пропонується CFD-моделювання в програмному середовищі SimScale, що дає можливість визначити розподіл швидкості й тиску повітряного потоку та ряд показників їх зміни. Проведено чисельне дослідження двох варіантів просторових структур за однаковою вхідною швидкістю повітряного потоку 5 м/с. Встановлено, що найбільше зниження швидкості повітряного потоку – 60 % - забезпечує структура з пружними криволінійними з'єднаннями, для якої коефіцієнт зниження тиску становить 0,280. Показано, що параметричне проектування та адитивне виробництво дають змогу формувати метатекстильні структури з диференційованими вітрозахисними характеристиками. Запропонований підхід може бути використаний для розроблення легких і гнучких функціональних елементів одягу з локально керованим рівнем захисту від вітрового впливу.

Ключові слова: метатекстиль, вітрозахисна структура, адитивне виробництво, 3D-друк, просторові комірчасті структури, вітропроникнення, аеродинамічний опір, CFD-моделювання, повітропроникність.

MYTSA VIKTORIYA

Khmelnytsky National University

RIABCHYKOV MYKOLA

Lutsk National Technical University

CREATION OF WIND-PROTECTIVE METATEXILE STRUCTURES USING ADDITIVE MANUFACTURING METHODS

The paper investigates the potential of additive manufacturing for the development of wind-protective textile metastructures with controlled aerodynamic characteristics. The study is based on the concept that the resistance of a textile structure to an airflow can be controlled not only by the properties of the material but also by its spatial architecture. Particular attention is paid to open-cell structures formed by periodically repeated nodal elements and curvilinear connecting links. Such an architecture makes it possible to modify the trajectory of the airflow while maintaining an open structure rather than completely blocking air movement by means of a continuous impermeable layer. The influence of the spatial arrangement of structural elements on the aerodynamic behaviour of the proposed metastructures is considered, with emphasis on the role of cell geometry, element orientation, thickness, porosity, and the configuration of connecting links.

Computational fluid dynamics (CFD) modelling was proposed as a tool for evaluating the airflow characteristics of the developed structures. The numerical analysis was performed in the SimScale environment using three-dimensional models of the investigated structures. The computational approach makes it possible to determine the spatial distribution of air velocity and pressure and to obtain quantitative characteristics describing changes in the air flow after its interaction with the metastructure. Two variants of spatial unit-cell configurations were numerically investigated under identical inlet conditions, with an air-flow velocity of 5 m/s. The analysis demonstrated a noticeable influence of the orientation and configuration of the curvilinear connecting elements on the airflow parameters. The structure incorporating elastic curvilinear connections provided the highest reduction in airflow velocity, reaching 60 %. For this structure, the pressure reduction coefficient was ($C_p=0.280$). The obtained results indicate that modification of the spatial architecture can produce measurable differences in the resistance of the structure to airflow.

The results demonstrate the feasibility of using parametric geometric design in combination with additive manufacturing to develop textile metastructures with differentiated wind-protective characteristics. Unlike conventional approaches based primarily on the selection of a continuous windproof material, the proposed concept considers spatial geometry as an additional design variable for controlling airflow behaviour. This approach provides opportunities for developing lightweight and flexible functional clothing elements in which the required level of wind protection can be locally adjusted according to the intended function of different clothing zones. Further research should address the influence of airflow velocity and incidence angle, cell size and geometry, structural-element thickness, and the number of structural layers. Experimental validation of the CFD results using additively manufactured physical specimens, as well as consideration of the textile substrate in the computational model, is also required.

Keywords: metatextile, wind-protective structure, additive manufacturing, 3D printing, spatial cellular structures, wind permeability, aerodynamic resistance, CFD modelling, air permeability.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.08.2026

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/)

© Мица Вікторія, Рябчиков Микола

Постановка проблеми у загальному вигляді

Сучасний розвиток легкої промисловості, текстильних технологій та адитивного виробництва зумовлює необхідність створення функціональних матеріалів з наперед заданими властивостями. Одним із актуальних напрямів є розроблення вітрозахисних текстильних структур, які забезпечують захист від потоків холодного

повітря та вітрового навантаження, водночас зберігаючи повітро- та паропроникність, гнучкість, малу масу та комфортність. Традиційні вітрозахисні рішення ґрунтуються переважно на використанні щільних тканин, багатошарових пакетів матеріалів або полімерних мембран, що може знижувати повітро- та паропроникність, погіршувати теплообмін і комфортність виробів. Тому актуальним є пошук конструктивно-технологічних підходів до вибіркового керування взаємодією текстильних структур із повітряними потоками.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є застосування метатекстильних структур – штучно спроектованих текстильних або текстильно-полімерних структур, функціональні властивості яких визначаються не лише характеристиками матеріалу, а й їхньою геометрією, внутрішньою архітектурою та просторовою організацією. Проектування комірчастих, багатошарових або деформованих структур дає змогу цілеспрямовано регулювати проходження повітряного потоку, аеродинамічний опір і локальну проникність матеріалу. Застосування адитивного виробництва розширює можливості створення складних тривимірних метатекстильних структур і точного керування їхніми геометричними параметрами, зокрема формою і розмірами комірок, товщиною елементів, пористістю, просторовою орієнтацією та градієнтом властивостей.

Використання адитивного виробництва також створює передумови для персоналізації вітрозахисних елементів з урахуванням умов експлуатації та анатомічних особливостей людини. Це особливо важливо для функціонального, спортивного, туристичного, спеціального та захисного одягу, до якого одночасно висуваються вимоги щодо захисту від зовнішнього середовища, мінімальної маси, гнучкості та ергономічності.

Таким чином, створення вітрозахисних метатекстильних структур методами адитивного виробництва є перспективним науково-практичним напрямом, що поєднує можливості цифрового проектування, адитивних технологій і текстильного матеріалознавства. Дослідження таких структур спрямовані на розроблення матеріалів із керованими вітрозахисними властивостями, що дає змогу підвищити функціональність і комфортність текстильних виробів та розширити можливості застосування адитивного виробництва в легкій промисловості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасний розвиток функціонального текстилю характеризується пошуком способів цілеспрямованого формування експлуатаційних властивостей матеріалів і текстильних систем. Одним із перспективних напрямків є використання структурного підходу, за якого необхідні характеристики визначаються не лише властивостями вихідного матеріалу, а й геометрією, пористістю та просторовою організацією структурних елементів. Особливого значення такий підхід набуває для текстильних матеріалів, призначених для експлуатації в умовах вітрового впливу, оскільки рух повітря може суттєво змінювати умови теплообміну та впливати на теплозахисні характеристики текстильної системи.

В роботі [1] досліджено 3D-друковані кубічні ґратчасті структури, інтегровані з нетканним матеріалом, за різних умов вітрового впливу. Встановлено, що зміна коефіцієнта відкритої площі та просторового розташування ґратчастої структури впливає на опір повітряному потоку та тепловий опір системи, а геометрія 3D-друкованої структури може розглядатися як інструмент цілеспрямованого керування процесами конвективного теплообміну в пористих текстильних системах.

Важливим для розвитку цього напрямку є забезпечення одночасного поєднання вітрозахисних властивостей із необхідним повітрообміном та гнучкістю матеріалу. У роботі [2] досліджено дихаючі 3D-друковані текстильні структури на основі гнучких ґратчастих елементів. Авторами розглянуто різні типи геометрії комірчастих структур та їхній вплив на характеристики 3D-друкованого текстилю, що підтверджує можливість використання геометричних параметрів як засобу регулювання функціональних і механічних властивостей матеріалу.

Водночас повітропроникність текстильного матеріалу визначається особливостями його внутрішньої структури та параметрами пористості. Автори роботи [3] досліджували вплив структурних параметрів текстильних матеріалів на опір повітряному потоку із застосуванням методів обчислювальної гідродиніміки та машинного навчання. Показано, що геометричні характеристики структури можуть бути використані для прогнозування повітропроникності та оптимізації властивостей технічного текстилю.

Значний потенціал у цьому напрямі пов'язаний із застосуванням адитивного виробництва, яке забезпечує можливість формування складних просторових структур із заданими геометричними параметрами. Сучасний огляд [4-6] свідчить про розширення застосування 3D-друку для створення «розумних» та мультифункціональних текстильних матеріалів, зокрема структур, у яких функціональні характеристики формуються шляхом поєднання властивостей полімерного матеріалу та особливостей його просторової організації. Застосування 3D-прототипування для створення текстильних структур із керованими параметрами також розглянуто у роботі [7]. Використання цифрових методів проектування дає можливість змінювати геометричні параметри структури на етапі її формування та досліджувати їхній вплив на характеристики отриманого матеріалу.

Подальший розвиток структурного підходу пов'язаний із формуванням метаструктур, функціональні властивості яких визначаються особливостями їхньої геометрії та просторової архітектури. Одним із прикладів є 3D-друковані ауксетичні структури, для яких зміна топології та геометричних параметрів дає можливість керувати деформаційною поведінкою матеріалу. В роботі [8] досліджували ауксетичну поведінку 3D-друкованих структур на основі ABS та вуглецеволокнистого поліаміду, що підтверджує можливість цілеспрямованого формування механічних характеристик за рахунок зміни архітектури структури. Схожий принцип реалізується у інспірованих текстильних структурах, де текстильна архітектура використовується як основа для створення

просторових структур із заданою механічною поведінкою [9]. Таким чином, сучасні дослідження демонструють поступовий перехід від використання 3D-друку переважно як технології виготовлення до його застосування як засобу формування функціонально орієнтованої просторової архітектури матеріалу.

Отже, результати сучасних досліджень підтверджують перспективність поєднання адитивного виробництва, цифрового проектування та структурного підходу для створення текстильних матеріалів із керованими властивостями. Водночас наявні дослідження переважно зосереджені на окремих характеристиках 3D-друкованих структур – повітропроникності, механічній поведінці, аусетичності, енергопоглинанні або теплозахисті. Недостатньо дослідженим залишається комплексне проектування метатекстильних структур, у яких геометрія комірчастої архітектури безпосередньо пов'язується з формуванням необхідного опору повітряному потоку за одночасного забезпечення гнучкості, повітрообміну та експлуатаційної комфортності вітрозахисного одягу.

Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованих конструктивно-технологічних принципів створення вітрозахисних метатекстильних структур методами адитивного виробництва шляхом керованого проектування їхньої просторової геометрії та параметрів комірчастої структури для забезпечення необхідного опору повітряному потоку за одночасного збереження достатніх показників гнучкості, повітрообміну та експлуатаційної комфортності.

Виклад основного матеріалу

Обґрунтування структури метатекстильних друкованих матеріалів для опору

Розглянуто варіанти просторових комірчастих структур, сформованих із повторюваних вузлових елементів та з'єднувальних криволінійних ланок. Геометрія структур передбачає можливість керування розміром пор, густиною розташування вузлів, товщиною елементів та їхньою просторовою орієнтацією. Перша структура (рис.1) являє собою просторову комірчасту систему, утворену повторюваними вузловими елементами, з'єднаними між собою криволінійними кільцеподібними або дугоподібними елементами. З'єднувальні елементи розташовані переважно у вертикальних площинах і утворюють розгалужену тривимірну мережу.

Особливістю структури є значна кількість вертикально орієнтованих елементів, які взаємодіють із повітряним потоком. Під час проходження через відкриту пористу структуру потік змінює напрям, багаторазово взаємодіючи з криволінійними та вузловими елементами, що сприяє збільшенню довжини його траєкторії, локальній зміні швидкості та виникненню зон завихрення. Таким чином, опір повітряному потоку формується за рахунок багаторазового перешкодження його прямолінійному руху та розсіювання кінетичної енергії. Відкриті проміжки між елементами водночас забезпечують збереження повітропроникності структури.

Друга структура (рис.2) також складається з повторюваних вузлових елементів, однак криволінійні з'єднувальні елементи розташовані переважно в горизонтальних площинах. У результаті формується багатшарова просторова система, в якій структурні елементи послідовно взаємодіють із повітряним потоком.

Така архітектура сприяє багаторазовій зміні напрямку руху повітря та його розподілу між окремими каналами. Опір повітряному потоку формується за рахунок послідовного проходження через структурні шари та ускладнення траєкторії його руху. Багатшарова будова структури дає можливість змінювати характер взаємодії з потоком залежно від його напрямку відносно поверхні матеріалу.

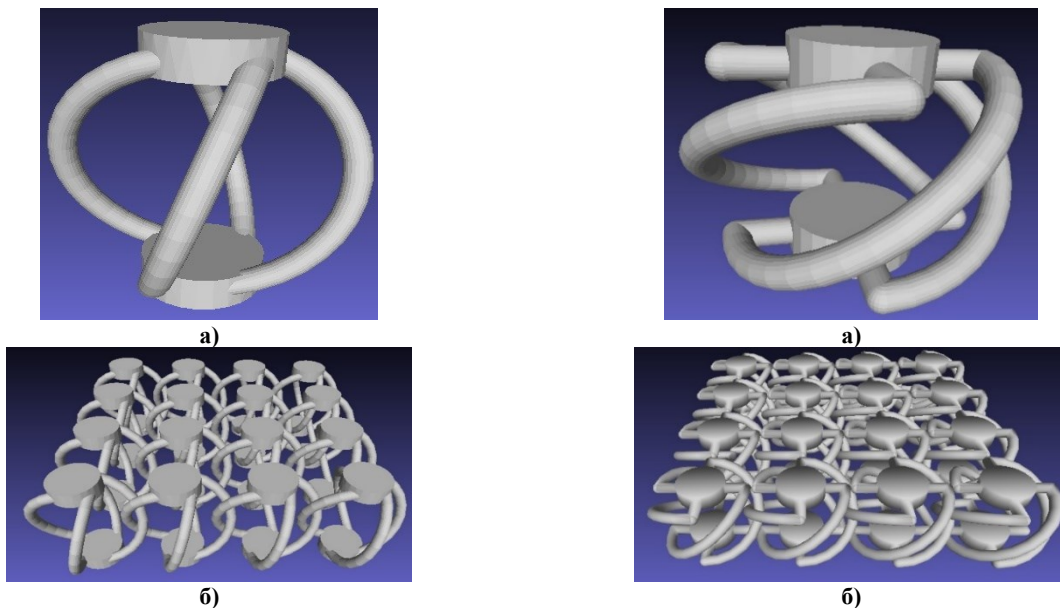


Рис. 1. Метатекстильна структура з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками: (а) одинична комірка; (б) структура, сформована повторенням комірки

Рис. 2. Метатекстильна структура з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками: (а) одинична комірка; (б) структура, сформована повторенням комірки

Можливість використання наведених структур як вітрозахисних метатекстильних елементів визначається їхньою просторовою пористою архітектурою. На відміну від суцільного непроникного матеріалу,

такі структури не повністю блокують рух повітря, а створюють систему керованих каналів і перешкод. Величина аеродинамічного опору залежить від геометричних параметрів структури, зокрема розміру та форми пор, товщини з'єднувальних елементів, кількості шарів, густини розташування вузлів, їхньої орієнтації відносно вітру.

Параметричне проектування одиничної комірки дає можливість змінювати ці характеристики без зміни матеріалу. Зменшення розмірів комірки або збільшення товщини з'єднувальних елементів може підвищити опір повітряного потоку, тоді як збільшення відкритої площі сприяє збереженню повітрообміну.

Перспективним напрямком є створення градієнтних вітрозакисних структур, у яких пористість змінюється залежно від функціонального призначення окремих ділянок. Зменшення розміру пор у зонах підвищеного вітрового впливу може сприяти збільшенню опору повітряного потоку, тоді як більш відкрита архітектура в інших ділянках забезпечуватиме необхідний повітрообмін. Реалізація таких структур можлива завдяки параметричному проектуванню геометрії в цифровому середовищі.

CFD-моделювання вітропроникнення метатекстильних структур

Параметричне проектування метатекстильних структур дає можливість керувати їхнім опором повітряному потоку без зміни матеріалу. Для оцінки впливу геометричних параметрів на характер проходження повітря використано CFD-моделювання.

Склад просторової геометрії досліджуваних структур із повторюваними елементами, каналами та поверхнями зумовлює необхідність чисельного аналізу розподілу швидкості та тиску повітряного потоку. Для моделювання використовується програмне середовище SimScale, що дає змогу працювати з тривимірними CAD-моделями та виконувати розрахунки течії повітря в складних просторових каналах.

Основними геометричними параметрами, що впливають на характер проходження повітря через структуру, є розмір і форма пор, товщина з'єднувальних елементів, їхня орієнтація в просторі та радіус заокруглення.

Для дослідження вітропроникнення метатекстильної структури формується розрахункова область із повітрям, у якій структура розміщується перпендикулярно або під заданим кутом до напрямку потоку:

вхід → метаструктура → вихід

На вході задається швидкість повітря U , а на виході – відповідна гранична умова. Результатами CFD-моделювання можуть бути розподіли швидкості та тиску повітряного потоку, перепад тиску до і після структури, зони прискорення та гальмування потоку, а також параметри, що характеризують опір і проникність структури.

Для дослідження запропонованих структур у середовищі SimScale доцільним є застосування методу Incompressible LBM (Lattice Boltzmann Method), призначеного для моделювання течії повітря за малих чисел Ma ($Ma < 0.3$). Використання цього підходу дає можливість досліджувати складні просторові геометрії метаструктур та оцінювати характер проходження повітряного потоку через їхні пори й канали.

Застосування CFD-моделювання дає можливість оцінювати вплив зміни геометричних параметрів на характеристики вітропроникнення без виготовлення фізичного зразка для кожного варіанта структури.

Для кількісної оцінки вітропроникнення метаструктури доцільно ввести коефіцієнт проникнення:

$$K_p = \frac{v_{out}}{v_{in}}, \quad (1)$$

де: v_{in} – середня швидкість повітря перед метаструктурою; v_{out} – середня швидкість після неї.

Також визначається перепад тиску:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (2)$$

та коефіцієнт опору:

$$C_d = \frac{2\Delta p}{\rho v_{in}^2}, \quad (3)$$

де ρ – густина повітря.

SimScale дозволяє отримувати поля швидкості та тиску, а також інтегральні характеристики потоку на заданих поверхнях. Результати моделювання можуть бути використані для подальшого порівняння досліджуваних геометрій. Адитивне виробництво дає можливість реалізовувати складні просторові геометрії, зокрема періодичні комірчасті та градієнтні структури, внутрішні канали та інші архітектури, параметри яких можуть цілеспрямовано змінюватися під час проектування.

Для запропонованих метатекстильних структур CFD-моделювання дає можливість перейти від інтегральної оцінки проникності до аналізу просторового розподілу швидкості та тиску повітряного потоку в структурі. Методика дослідження:

3D-модель метаструктури → підготовка CAD/STL → формування повітряної розрахункової області → побудова CFD-моделі → задання параметрів потоку та властивостей повітря → CFD/LBM-розрахунок → визначення $v, p, \Delta p, K_p, C_d$ → порівняння геометрій → оптимізація конструкції.

Для складної просторової геометрії доцільно виконати дослідження незалежності результатів від розрахункової сітки, оскільки дрібні канали та зазори повинні бути достатньо розділені сітковими елементами. SimScale передбачає можливість локального уточнення сітки та проведення mesh-sensitivity studies (дослідження чутливості сітки).

Таким чином, SimScale може бути використано як програмне середовище для CFD-дослідження вітропроникнення адитивно виготовлених текстильних метаструктур, зокрема, для аналізу складних 3D-геометрій та параметричного порівняння їхніх характеристик. Для досліджуваної структури застосування LBM є доцільним варіантом чисельного моделювання, однак остаточний вибір розрахункового підходу має визначатися з урахуванням геометричних параметрів структури, характеру потоку та необхідної точності розрахунку.

Результати дослідження вітропроникнення

На основі описаної методики отримано поля фізичних параметрів повітряного потоку при обтіканні елементів досліджуваних метатекстильних структур. Розподіл швидкості повітряного потоку у вертикальному перерізі для комірок із вертикально та горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками, наведено на рис. 3. Розподіл тиску для відповідних варіантів структури представлено на рис. 4.

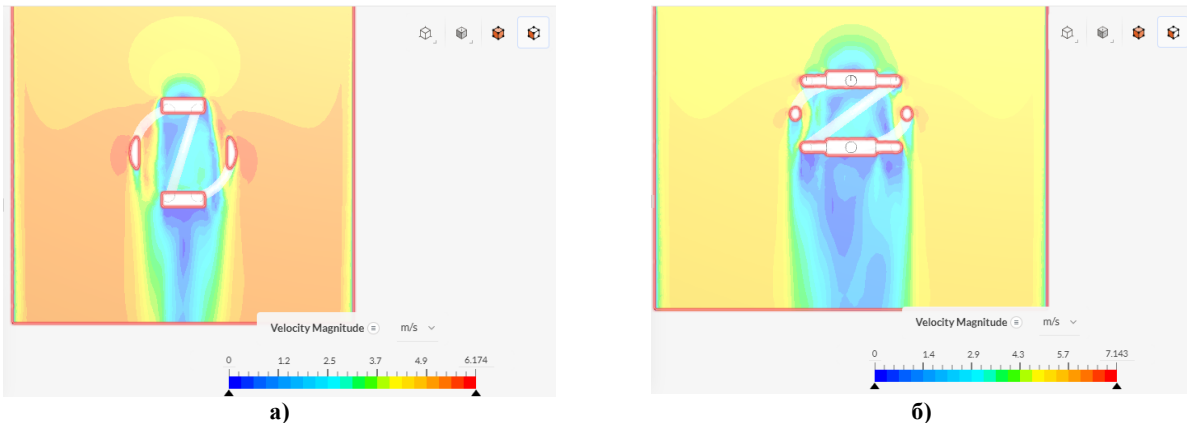


Рис. 3 Поле швидкості при обтіканні повітряним потоком елемента метаструктури у вертикальному перерізі: а) комірка з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками; б) комірка з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками

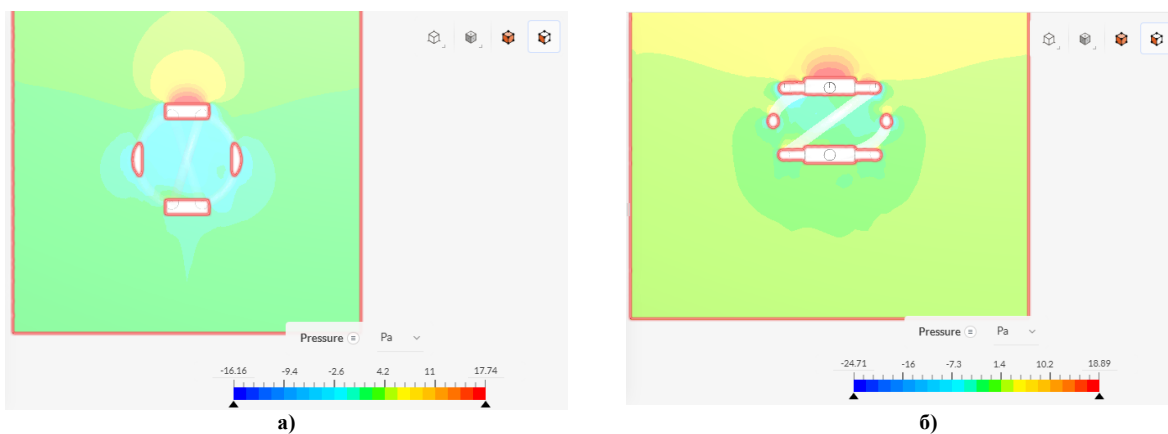


Рис. 4 Поле тиску при обтіканні повітряним потоком елемента метаструктури у вертикальному перерізі: а) комірка з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками; б) комірка з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками

Як видно з рис. 3, 4, характер розподілу швидкості та тиску повітряного потоку відрізняється для досліджуваних варіантів комірок. За результатами моделювання можна оцінити вплив різних структур на зниження швидкості повітряного потоку та зміну тиску при його проходженні через метаструктуру. Така оцінка є важливою для визначення ефективності структури у випадку впливу повітряного потоку, зокрема під час захисту від сильного вітру. При цьому в розрахунковій моделі не враховано вплив текстильного матеріалу, яким може бути покрита метаструктура. Його наявність може суттєво змінювати характеристики проходження повітряного потоку, однак у межах цього дослідження оцінюється вплив просторової геометрії самої метаструктури.

За вхідної швидкості повітряного потоку v_{in} та вихідної швидкості v_{out} зниження швидкості знаходиться за формулою $\delta = \frac{v_{in} - v_{out}}{v_{in}} \cdot 100\%$. Чим більше значення цього показника, тим більший ступінь зниження швидкості повітряного потоку забезпечує структура.

Вхідний тиск позначимо p_{in} , вихідний – p_{out} . Падіння тиску $\Delta p = p_{in} - p_{out}$. Відповідно до прийнятої методики, зниження тиску визначається формулою:

$$\Delta p = C_p \frac{\rho v_{in}^2}{2}, \quad (4)$$

де C_p – коефіцієнт зниження тиску. Чим цей коефіцієнт вищий, тим структура ефективніша. Результати оцінювання зниження швидкості та тиску повітряного потоку для досліджуваних структур наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Зниження динамічних параметрів повітря при проходженні через метаструктуру

Метатекстильна структура	v_{in} , м/с	v_{out} , м/с	δ , %	p_{in} , Па	p_{out} , Па	Δp , Па	C_p
комірка з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками	5	2,2	56	5,8	-1,2	7,0	0,233
комірка з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками	5	2	60	6,6	-1,8	8,4	0,280

Наведені в табл. 1 результати свідчать про відмінності в характері проходження повітряного потоку через досліджувані структури. Для комірки з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками зниження швидкості повітряного потоку становить 56%, тоді як для комірки з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками – 60%. Отже, горизонтальна орієнтація з'єднувальних ланок забезпечує більше зниження швидкості потоку.

Аналогічна тенденція здатності до показників тиску. Падіння тиску для структури з вертикально орієнтованими з'єднувальними ланками становить 7 Па, а для структури з горизонтально орієнтованими ланками – 8,4 Па. Значення коефіцієнта зниження тиску C_p становлять відповідно 0,233 та 0,280. Таким чином, за умов моделювання комірка з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками характеризується більшим зниженням швидкості повітряного потоку та більшим падінням тиску.

Отримані результати підтверджують вплив просторової орієнтації з'єднувальних ланок на повітрязахисні характеристики метатекстильної структури та доцільність використання геометричних параметрів для керування її аеродинамічними властивостями.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Обґрунтовано перспективність створення вітрозахисних метатекстильних структур методами адитивного виробництва. Показано, що просторове компонування структурних елементів дає можливість керувати характером проходження повітряного потоку без використання суцільної непроникної структури. Функціональні характеристики запропонованих структур визначаються їхньою просторовою геометрією, зокрема розміром і формою пор, товщиною та орієнтацією з'єднувальних елементів.

Встановлено вплив просторової орієнтації з'єднувальних ланок на динамічні параметри повітряного потоку. За результатами CFD-моделювання комірка з горизонтально орієнтованими з'єднувальними ланками забезпечила зниження швидкості повітряного потоку на 60% порівняно з 56% для комірки з вертикально орієнтованими ланками. Падіння тиску становило відповідно 8,4 та 7,0 Па, а коефіцієнт зниження тиску C_p – 0,280 та 0,233. Отримані результати підтверджують можливість використання просторової геометрії для зміни вітрозахисних характеристик метатекстильних структур.

Підтверджено доцільність застосування CFD-моделювання в середовищі SimScale для попереднього оцінювання та порівняння геометричних варіантів метатекстильних структур. Чисельне моделювання дає можливість досліджувати поля швидкості та тиску й визначати ряд показників зміни параметрів повітряного потоку без виготовлення фізичного зразка для кожної геометричної модифікації.

Результати чисельного моделювання показали відмінності досліджених структур щодо зниження швидкості повітряного потоку. За однакової вхідної швидкості $v_{in} = 5$ м/с вихідна швидкість становила 2,20 м/с для першої структури та 2,00 м/с для другої структури. Отже, друга структура забезпечила найбільше зниження швидкості повітряного потоку – 60 %, тоді як перша структура характеризувалася меншим ефектом – 56 %.

Порівняння коефіцієнта зниження тиску також підтвердило відмінності між дослідженими структурами. Для структур отримано $C_p = 0,233$ та 0,280 відповідно. За прийнятих умов моделювання друга структура характеризується найбільшим зниженням тиску повітряного потоку.

Встановлено перспективність параметричного проектування метатекстильних структур для формування диференційованого вітрозахисту окремих зон одягу. Керована зміна геометричних параметрів структури дає можливість змінювати її аеродинамічні характеристики відповідно до функціонального призначення.

Перспективи подальших досліджень полягають у встановленні впливу швидкості та кута набігання повітряного потоку, розміру і форми комірок, товщини з'єднувальних елементів та деяких структурних шарів на вітрозахисні характеристики метаструктур. Можливим етапом є також експериментальна верифікація результатів CFD-моделювання на фізичних зразках та врахування впливу текстильної основи, яка у представленій чисельній моделі не враховувалася. Отримані результати створюють науково-технологічне підґрунтя для подальшого розроблення легких, гнучких та локально керованих вітрозахисних елементів одягу на основі адитивно виготовлених метатекстильних структур

References

1. Alakhdar, M., Vinches, L. & Hallé, S. (2026). Investigating thermal performance of 3D-printed cubic lattices integrated in bio-based nonwoven assemblies under wind exposure. *Progress in Engineering Science*. 3, 100285. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100285>.

2. Liu, J., Hu, L., Lui, K.-W., Wong, S. W.-F. & Jiang, S.-X. (2025). Design and characterization of breathable 3D printed textiles with flexible lattice structures. *Journal of Manufacturing Processes*. 141, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.062>.
3. Bianca, E., Beigialou, G., Ferri, A. & Boccardo, G. (2026). CFD and Machine Learning Approaches for Predicting Air Permeability in Technical Textiles. *Textiles*. 6(1), 9. <https://doi.org/10.3390/textiles6010009>.
4. Dejene, B. K., Seidu, R. K., Abtew, M. A. (2026). Recent advances in 3D printed smart and multifunctional textile materials: Processing, properties, and their applications. *Reactive and Functional Polymers*. 224, 106755. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2026.106755>.
5. Polishchuk, A., Slavinska, A., Polishchuk, O. & Mytsa, V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. 2889 (1): 040009. <https://doi.org/10.1063/5.0172971>.
6. Mytsa, V. & Riabchykov, M. (2024). Improvement of intelligent systems for creating personalized products. *Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2024 – ITTAP 2024*. 3896, 235-247. <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper13.pdf>.
7. Mytsa, V., Riabchykov, M., Popova, T., & Nikulina A. (2025). Development of textile structures using 3D prototyping technologies. *Technology Audit and Production Reserves*. 2(3(82), 18–23. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.327068>.
8. Pellegrini, A. et. al. (2024). Auxetic behavior of 3D-printed structure made in acrylonitrile butadiene styrene and carbon fiber-reinforced polyamide. *Progress in Additive Manufacturing*. 9, 461–469. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00465-0>.
9. Jayswal, A. et. al. (2025). High compressive energy absorption and shape recovery behavior of additively manufactured textile-inspired cylindrical braided metamaterials. *Additive Manufacturing*. 104925. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104925>.