

**СИНЮК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9615-0729>e-mail: [oleg.synjuk@khmnu.edu.ua](mailto:oleg.synjuk@khmnu.edu.ua)**ЄРІЙ АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-6919-4809>e-mail: [andrii.yerii@khmnu.edu.ua](mailto:andrii.yerii@khmnu.edu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ІМПРЕГНУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі представлено результати аналізу сучасних методів імпрегнування текстильних матеріалів, їх технологічних особливостей, переваг та обмежень. Детально досліджено технологічне обладнання для просочування тканин і волокон, а також запропоновано класифікацію актуальних методів обробки.

Сучасні галузі промисловості (авіабудування, виробництво спецодягу, інтер'єрні матеріали) вимагають підвищених експлуатаційних характеристик текстилю, зокрема вогнестійкості, гідрофобності та стійкості фарбування. Товстошарові матеріали (ватин, технічні неткані полотна, важкі брезенти) традиційно мають низьку глибину просочування антипіренами та барвниками. Класичні методи (занурення, розпилення) нерідко забезпечують недостатньо рівномірний розподіл реагентів у внутрішніх шарах, що знижує ефективність обробки. У зв'язку з цим, пріоритетним напрямком досліджень є розробка інноваційних технологій, зокрема: ультразвукова кавітація, вакуумне імпрегнування, застосування наноемульсій та плазмова модифікація.

На основі аналізу існуючих підходів сформовано багаторівневу класифікацію методів просочування та систематизовано відповідне технологічне обладнання. Окреслено перспективні напрямки підвищення вогнестійкості, що потребують подальших досліджень, виокремлено кавітаційний метод імпрегнування.

Ключові вимоги до сучасних технологій імпрегнування: ефективність – глибоке та рівномірне просочування товстих матеріалів; збереження механічних властивостей матеріалу; скорочення часу обробки.

Теоретичні дослідження доводять, що комбінація занурення з ультразвуковою кавітацією забезпечує: підвищення глибини проникнення реагентів через мікроударні ефекти, що розширюють пори волокон; однорідний розподіл імпрегнантів по всій товщині; скорочення тривалості процесу порівняно з традиційними методами.

**Ключові слова:** імпрегнування, методи просочування, текстильні матеріали, обробка текстильних тканин.

**SYNYUK OLEH****YERII ANDRII**

Khmelnyskyi National University

## RESEARCH ON MODERN METHODS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR IMPREGNATING TEXTILE MATERIALS

This paper presents the results of an analysis of modern methods for impregnating textile materials, their technological features, advantages, and limitations. The technological equipment for impregnating fabrics and fibers is examined in detail, and a classification of current treatment methods is proposed.

Modern industrial sectors (aircraft manufacturing, specialized clothing production, interior materials) demand enhanced performance characteristics of textiles, specifically fire resistance, hydrophobicity, and dye fastness. Thick-layer materials (batting, technical non-woven fabrics, heavy tarpaulins) traditionally exhibit low penetration depth of flame retardants and dyes. Classical methods (immersion, spraying) often fail to ensure sufficiently uniform distribution of reagents within the inner layers, reducing treatment effectiveness. Consequently, a priority research direction is the development of innovative technologies, such as: ultrasonic cavitation, vacuum impregnation, application of nanoemulsions, and plasma modification.

Based on the analysis of existing approaches, a multilevel classification of impregnation methods has been developed and the corresponding technological equipment has been systematized. Promising directions for enhancing fire resistance requiring further research have been outlined, with the cavitation impregnation method highlighted.

Key requirements for modern impregnation technologies include: effectiveness – deep and uniform impregnation of thick materials; preservation of the material's mechanical properties; reduction of processing time.

Theoretical studies demonstrate that combining immersion with ultrasonic cavitation ensures: increased reagent penetration depth due to micro-impact effects that expand fiber pores; homogeneous distribution of impregnants throughout the entire thickness; reduced process duration compared to traditional methods.

**Keywords:** impregnation, impregnation methods, textile materials, textile fabric treatment.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.07.2025

### Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний технологічний розвиток висуває нові вимоги до функціональних властивостей текстильних матеріалів, особливо у таких критичних галузях, як авіабудування, виробництво спеціального захисного одягу та створення інтер'єрних матеріалів. Ці сектори промисловості потребують текстилю з підвищеними експлуатаційними характеристиками, серед яких ключовими є

вогнестійкість, гідрофобність (стійкість до зволоження) та стабільність забарвлення (стійкість фарбування) [1]. Забезпечення цих властивостей стає особливо складним завданням при роботі з товстошаровими та багатшаровими текстильними структурами, такими як ватин, технічні неткані полотна чи важкі брезенти, які широко застосовуються у відповідних продуктах через їхні конструктивні переваги.

Основна технологічна складність імпрегнування полягає в недостатній глибині та неефективній рівномірності просочування цих матеріалів функціональними реагентами – вогнезахисними сполуками (антипіренами), гідрофобізаторами та барвниками. Класичні промислові методи обробки, такі як просте занурення (дип-котинг) або розпилення (спрей-нанесення), демонструють серйозні недоліки при роботі з товстими текстильними матеріалами. Вони не забезпечують повноцінного проникнення активних компонентів у глибинні шари матеріалу, що призводить до значної неоднорідності розподілу імпрегнантів по товщині виробу. Навіть при використанні високоєфективних хімічних реагентів (наприклад, таких, що діють через механізми утворення захисного коксового шару, виділення інертних газів або ендотермічного поглинання тепла), фізична недоступність внутрішніх ділянок матеріалу для просочувального розчину різко знижує загальну ефективність обробки. Це стає особливо критичним для матеріалів із низькою природною капілярністю та щільною структурою.

Неефективність стандартних методів імпрегнування щодо товстошарових текстильних матеріалів має кілька ключових наслідків: зниження рівня безпеки (недостатня обробка внутрішніх шарів призводить до зменшення реальної вогнестійкості матеріалу, зростання ризику займання та поширення полум'я, особливо в умовах тривалого теплового впливу чи прямого контакту з вогнем); нестабільність експлуатаційних властивостей (нерівномірний розподіл імпрегнантів спричиняє місцеві зони з підвищеною змочуваністю, зниженою стійкістю до вигорання кольору або недостатньою гідрофобністю, що зменшує термін служби виробу; недосконалість процесу (класичні методи часто потребують тривалого часу обробки, значної витрати хімікатів [через велику кількість ванн або необхідність повторних циклів] і можуть негативно впливати на механічні характеристики матеріалу [наприклад, знижувати міцність або гнучкість]).

Ці обмеження прямують у розріз із сучасними вимогами до промислових технологій, які вимагають глибокого та однорідного насичення, збереження вихідних механічних властивостей матеріалу, скорочення часу та ресурсомісткості процесу, а також підвищення екологічної безпеки. Тому, існує необхідність системного аналізу методів імпрегнування, що дозволить виокремити переваги та недоліки способів обробки тканин шляхом їхнього просочування в імпрегуючих розчинах.

На даний момент відсутня чітка класифікація методів та технологій імпрегнування текстильних матеріалів, що створює складнощі в підборі актуального методу обробки тканин. Також, існує проблема в контексті відсутності порівняльної характеристики інноваційних методів імпрегнування тканини, що спричиняє необхідність їх аналізу та зіставлення їх ефективності із широко поширеними класичними методами.

У зв'язку з цим, пріоритетним науково-технічним завданням стає, дослідження актуальних станом на сьогодні методів імпрегнування текстильних матеріалів, розробка та впровадження багаторівневої класифікації в якій буде передбачено систематизацію інноваційних методів, що визначатиметься за характерними ознаками технологічного обладнання для імпрегнування товстошарових текстильних матеріалів.

Таким чином, необхідність підвищення експлуатаційних характеристик (особливо вогнестійкості) товстошарових текстильних матеріалів для критичних галузей промисловості у поєднанні з принциповою неефективністю традиційних методів імпрегнування щодо цих матеріалів формує актуальну науково-технологічну проблему. Її вирішення вимагає інтенсивних досліджень та розробки нових методів обробки, здатних забезпечити глибоке, рівномірне та ефективне просочування складних текстильних структур з дотриманням сучасних вимог до якості, продуктивності та безпеки. Пріоритетним завданням дослідження є не лише констатація проблеми, а й глибинний аналітичний огляд сучасних методів імпрегнування та технологічного парку. Систематизація знань про фізичні принципи дії, технічні характеристики обладнання та ефективність технологій створить наукову базу для розробки нових рішень, здатних забезпечити глибоке та рівномірне просочування складних текстильних структур з дотриманням сучасних вимог до ефективності та ресурсозбереження.

#### **Формулювання цілей статті**

**Метою роботи є:** систематизація методів імпрегнування тканин, узагальнення технологічного устаткування, що використовується для підвищення якісних показників текстильних матеріалів та виокремлення перспективних методів імпрегнування тканин та нетканих текстильних матеріалів.

#### **Аналіз досліджень та публікацій**

Історичний розвиток технологій імпрегнування текстилю базувався на механічному контакті матеріалу з рідким реагентом. Фундаментальним став патент [2], який систематизував метод занурення-віджиму (pad-dry). Цей принцип був технологічно вдосконалений у німецькому патенті [3] та американському [4], де запропоновано інтегровані лінії з послідовними операціями: імпрегнування у проточній ванні, віджим регульованим тиском, сушіння у барабанних сушарках та термофіксація у

камерах. Сучасні промислові аналоги, такі як система Bianco® INNO-PAD [5], зберігають цю архітектуру, пропонуючи регульовані параметри швидкості (0,5–120 м/хв) та тиску (0,1–5 бар). Однак, як зазначено в джерелі [6], навіть оптимізовані версії цих систем неефективні для товстошарових матеріалів (ватин, технічні неткані полотна товщиною >5 мм): капілярні сили недостатні для глибокої penetрації імпрегуючого розчину, що призводить до градієнта концентрації імпрегнантів (>30% різниці між поверхневим та внутрішнім шарами).

Для подолання обмежень пасивної дифузії розроблено інноваційні методи, що активують процес зовнішніми фізичними факторами. Вакуумне імпрегнування, втілене у патенті [7] та [8], запровадило цикл "вакуум-тиск" (0,01–0,5 атм.), що примусово заповнює пори текстилю. Ефективність підтверджена для брезентів товщиною 8–10 мм: система Bianco® INNO-PAD [5] демонструє зростання глибини просочування порівняно з класичним зануренням. Ультразвукова кавітація (УЗ-обробка) (частота 28–40 кГц) створює мікроударні хвилі, які розширюють пори волокон, руйнують повітряні пробки у грубих (щільних) матеріалах та підвищують глибину проникнення антипіренів. Технологічне втілення цього методу представлено у патенті [9] з ультразвуковими емітерами (УЗ-емітерами), інтегрованими у імпрегнаційні ванни.

В ході аналізу патентної бази та комерційних систем було виявлено три ключові напрями розвитку обладнання. По-перше, гібридизація методів, представлена у патенті [10], який інтегрує вакуумну камеру з УЗ-модулем (20 кГц) для обробки багатошарових композитів за один цикл продуктивністю до 50 м<sup>2</sup>/год. По-друге, пульсаційні технології, описані у праці [6], де гідропульсатори створюють коливання в розчині, підвищуючи penetрацію у щільні полотна. По-третє, адаптивні лінії типу Bianco® INNO-PAD [5] забезпечують регулювання швидкості конвеєра (від 0 до 500 кг/хв), програмований тиск пару (до 2 бар) та модульність для підключення додаткових блоків.

Незважаючи на значний прогрес, аналіз показав критичні прогалини у сучасних дослідженнях. Відсутність порівняльних даних щодо комбінованих методів ускладнює вибір оптимальної технології. Недостатнє дослідження впливу на механіку матеріалів (як у дослідженні [1], де не оцінювалася зміна міцності матеріалу) створює ризик втрати експлуатаційних властивостей. Обмежені масштаби плазмових/УЗ-установок (наприклад, лабораторний прототип у [9]) роблять неможливою промислово обробку >100 м<sup>2</sup>/год. Відсутність уніфікованих критеріїв вибору методу (обмежене вивчення лише хімічних аспектів у [9]) призводить до суб'єктивності при проектуванні ліній. Висока енергоємність процесів (особливо вакууму та плазми), що підтверджуються даними Bianco® INNO-PAD [5] (до 11 кВт·год/м<sup>3</sup> – резервуар та 30 кВт·год – вся лінія), збільшує собівартість продукції на 15–25%.

Систематизація публікацій доводить три етапи еволюції імпрегнування: від пасивної дифузії (ефективної лише для тонких тканин) через активну фізичну активацію (що забезпечує глибинне просочування товстих матеріалів) до гібридних та нанотехнологічних рішень. Пріоритетними науковими завданнями згідно з аналізом є: розробка експериментальної методики порівняння комбінацій методів (вакуум+УЗ, плазма+наноемульсія), дослідження впливу багатоциклової обробки на механічні властивості матеріалів [1], створення енергоефективних промислових установок продуктивністю >200 м<sup>2</sup>/год на базі сучасних патентів [9, 10] та розробка матриці вибору методу на основі товщини, щільності та хімії волокон [6].

### Виклад основного матеріалу

Імпрегнування (Просочування) – це технологічний процес, при якому текстильний матеріал (тканина, неткані матеріали, трикотаж, волокна) насичується спеціальними рідинами (розчинами, емульсіями, дисперсіями) з метою надання йому нових властивостей, які вихідний матеріал не має або має недостатньо. Це глибинна обробка, на відміну від поверхневих покриттів.

Сучасні технології імпрегнування повинні відповідати трьом основним критеріям:

- ефективність - забезпечення глибокого та рівномірного просочування, особливо для товстих матеріалів;

- екологічна безпека - використання нетоксичних вогнезахисних речовин (наприклад, фосфорорганічних або мінеральних добавок) та методів, що мінімізують витрати хімікатів;

- збереження механічних властивостей - обробка не повинна погіршувати структуру волокон або знижувати міцність матеріалу.

Також, можна виокремити певну технологічну особливість кожного методу в залежності від цілей та завдань які висуваються/ставляться до технологічного процесу обробки текстильних матеріалів.

Імпрегнування (просочування) матеріалу виконується з метою підвищення вогнестійкості, фарбування, надання текстильним матеріалам певних фізичних чи хімічних властивостей.

До основних цілей імпрегнування відносяться [1]:

- вогнезахист (підвищення вогнестійкості): запобігання займанню, поширенню полум'я, тлінню;

- гідрофобність/олеофобність/гідрофільність: підвищення водостійкості, захист від олій та жирів, або навпаки – покращене змочування;

- антимікробна/фунгіцидна/антиалергенна обробка: захист від бактерій, грибків, кліщів пилюки;

- статико-електричний захист: зниження або усунення накопичення статичної електрики;
- фарбування: забезпечення рівномірного та глибокого проникнення барвника;
- м'якість/антизминання/стабілізація розміру: покращення тактильних та експлуатаційних властивостей;
- укріплення/стабілізація: для технічних тканин, нетканих матеріалів (геотекстиль, основи для покриттів);
- ультрафіолетовий захист: захист волокон і забарвлення від вигорання.

Методи імпрегнування текстильних матеріалів мають чітко розмежовані особливості здійснення технологічних операцій обробки, відповідно, є можливість сформувати їхню класифікацію. Для цього необхідно проаналізувати методи імпрегнування, їх призначення та технологічне устаткування.

Традиційний метод просочування текстильних матеріалів – це **занурення** тканини у ванну з розчином імпрегнату. У дослідженні [1] бавовну просочували розчином  $\text{AgNO}_3$  при  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  протягом 10 хв. Після цього тканину промивали/обробляли за необхідною хімічною рецептурою. Дослідники застосовують також багатоступеневі ванни (напр., підлужування або попередня обробка перед основною імпрегнацією) для підвищення адгезії.

Метод повного занурення (просочення у ванні) є фундаментальною технологією імпрегнації текстильних матеріалів. Його принцип полягає у повному зануренні матеріалу (тканини, нетканого матеріалу, трикотажу) у ванну, заповнену імпрегуючим розчином, де він витримується протягом заданого часу. Це забезпечує глибокий та всебічний контакт волокон з імпрегуючою рідиною.

Після витримки в імпрегнанті тканину зазвичай віджимають (в гідравлічних центрифугах або між валками) для видалення надлишку рідини. Потім матеріал сушать тепловими методами. У лабораторних умовах використовують плоскі конвеєрні сушарки або стентерні (широкі стрічкові) сушильні машини. Наприклад, у згаданому дослідженні з AgNPs зразки сушили на плоскому транспортері фірми MESDAN (Італія). У виробництві використовують стентери або валково-топкові тунельні сушарки, де тканину підігрівають повітрям при  $\sim 100\text{--}150^\circ\text{C}$  продовж кількох хвилин [1].

Просте занурення – найпростіший і дешевий метод, але він повільний і часто дає нерівномірне просочення, особливо для щільних/багатошарових тканин. Потрібні довгі витримки і ретельне перемішування розчину. Наприклад, час витримки може сягати десятків хвилин, а сушка потребує кількох хвилин при високій температурі (відповідно контролюють часу та температури сушильних камер).

Основною перевагою цього методу є досягнення якісного та рівномірного поверхневого покриття матеріалу розчином по всій поверхні та об'ємного насичення не щільних гідрофільних тканин. Така глибинна обробка гарантує, що функціональні агенти потраплять у внутрішню структуру волокон і ниток. Крім того, процес занурення дозволяє досягти високого ступеня контролю за кількістю реагента, що вбирається матеріалом, шляхом регулювання часу витримки та концентрації розчину.

Однак метод має і суттєві недоліки. Він вимагає великої кількості імпрегуючого розчину для заповнення ванни, що може бути дорогим, особливо при використанні спеціалізованих хімікатів. Після занурення матеріал містить значну кількість надлишкового розчину, тому необхідний етап інтенсивного віджимання (механічного або за допомогою валків) для видалення цих надлишків та запобігання нерівномірному перерозподілу реагентів. Цей процес, а також наявність великої кількості вологи у просоченому матеріалі, призводять до великої енергоємності наступного етапу сушіння та фіксації, що значно збільшує загальні витрати на обробку. Також, при імпрегнуванні важких, товстих та багатошарових матеріалів виникає проблема нерівномірного насичення тканини та наявності повітряних пузирів в товщі матеріалу.

Незважаючи на витратність, метод повного занурення залишається основним і надійним способом для багатьох критично важливих видів обробки, де потрібне саме дешеве та ефективне просочення по всій структурі гідрофільного матеріалу. Це стосується, перш за все, вогнезахисних просочень, де захисний агент має бути присутнім у всіх волокнах для ефективної протидії вогню. Він також є ключовим для надання стійкої антимікробної дії, глибокої гідрофобізації (водостійкості) та є основою процесу фарбування багатьох видів тканин, особливо технічного призначення, меблевих тканин, важких шторних матеріалів та інших виробів, де вимоги до якості та довговічності обробки є високими.

**Метод наплення** (розпилення) ґрунтується на механічному нанесенні імпрегуючого розчину на поверхню текстилю. Принцип дії полягає в тому, що спеціальний розчин під тиском розпилюється на матеріал за допомогою різних типів форсунок, таких як пневматичні, безповітряні чи ультразвукові. Це створює дрібнодисперсний аерозоль (туман), який осідає на волокнах тканини.

Головними перевагами цього методу є значний ступінь економії використовуваного розчину, особливо коли потрібно обробити лише одну сторону матеріалу. Він також надає унікальну можливість проводити локальне нанесення розчину – обробка лише на певній ділянці. Процес відрізняється високою швидкістю виконання. Критично важливою перевагою є можливість обробляти великогабаритні або важкознімні конструкції та готові вироби безпосередньо на місці їх експлуатації, наприклад, натяжні стелі, готовий одяг чи текстильні елементи інтер'єру.

Однак метод має суттєві обмеження. Головним недоліком є поверхнєве або лише неглибоке проникнення розчину в структуру текстилю. Глибина проникнення сильно залежить від тиску розпилення, розміру крапель розчину (дисперсності) та властивостей самої тканини (щільності, гідрофільності). Це створює ризик виникнення нерівномірної обробки, що проявляється у вигляді "плямистості" – ділянок з різною інтенсивністю просочення розчину. Процес розпилення супроводжується інтенсивним туманоутворенням, що вимагає обладнання робочої зони потужною вентиляцією для захисту працівників та навколишнього середовища. Найважливіше обмеження полягає в тому, що через поверхневий характер обробки метод малоефективний для надання матеріалу глибинних функціональних властивостей, таких як повноцінний вогнезахист по всій товщині тканини.

Область застосування методу напилення визначається його перевагами та недоліками. Він ідеально підходить для нанесення легких гідрофобних та олієзахистних покриттів на готовий одяг, наприклад, куртки чи взуття. Його використовують для поверхневого вогнезахисту, часто як додатковий захід до основного глибинного просочування, або в ситуаціях, де занурення неможливе. Метод також ефективний для нанесення ароматизаторів чи дезодорантів на текстиль. Іноді його застосовують для певних видів фарбування або тонування вже готових виробів, де не потрібна абсолютна рівномірність чи глибина проникнення барвника.

У статті [11] розглядаються підходи поверхневого покриття бавовни антипіренами методами «золь–гель» та послідовним шаруванням. Автори підкреслюють, що обидва ці підходи дозволяють отримати тривалий ефект вогнезахисту при простому нанесенні покриття. Використання водних золь-гель композицій зі структуроутворювачами на основі кремнезему забезпечує однорідні покриття з чудовими вогнезахисними властивостями. Згідно з авторами, такі обробки можуть бути легко реалізовані на існуючих текстильних лініях просочення (impregnation/exhaustion). Методи «золь–гель» дозволяють надати тканинам не лише антипіренних властивостей, але й додаткових функцій (гідрофобності, електропровідності тощо), залежно від складу прекурсорів. Також відзначено, що застосування Р- та N-сполук у складі гелів є перспективним для заміни заборонених галогенованих сполук.

**Метод накатки** (пад-ролл) є широко вживаною технологією імпрегнації, особливо в безперервних виробничих процесах. Його принцип дії полягає в тому, що тканина послідовно проходить крізь ванну, заповнену імпрегуючим розчином, а потім безпосередньо між двома регульованими валками. Ця пара валків відіграє вирішальну роль: вони віджимають надлишки розчину та одночасно точно контролюють кількість рідини, яка залишається в структурі матеріалу після обробки. Така конструкція забезпечує рівномірний розподіл реагентів по всій ширині тканини.

Головними перевагами методу накатки є високий рівень контролю над ступенем наповнення тканини розчином, що досягається регулюванням зазору між валками та їхнього тиску. Це дозволяє точно дозувати кількість нанесеної хімії. Порівняно з повним зануренням, метод значно економічніший у використанні розчину, оскільки тканина не занурюється повністю, а лише просочується при проходженні крізь ванну, а надлишки ефективно видаляються. Його безперервний характер ідеально підходить для інтеграції у швидкісні виробничі лінії, де рулон тканини обробляється послідовно.

Однак метод має певні обмеження. Глибина проникнення розчину в товщу тканини зазвичай є меншою, ніж при повному зануренні матеріалу у ванну. Ефективність просочення істотно залежить від фізичних характеристик самої тканини – зокрема, її щільності, товщини ниток та змочуваності – а також від точності налаштувань валків (тиску, швидкості обертання). Неправильні налаштування можуть призвести до недостатнього або надмірного нанесення розчину.

Незважаючи на меншу глибину проникнення, метод накатки знаходить дуже широке практичне застосування завдяки своїй ефективності, контролю та придатності для масового виробництва. Він є основним способом нанесення барвників під час фарбування багатьох видів тканин. Його активно використовують для різноманітних видів апертурної обробки, спрямованої на поліпшення експлуатаційних властивостей матеріалу, наприклад, для надання м'якості або стійкості до зминання. Метод також добре зарекомендував себе для нанесення легких вогнезахисних покриттів та гідрофобізаційних обробок, де повне глибинне просочення не є обов'язковою вимогою, а важливі рівномірність та економічна доцільність.

Найпростіші установки для безперервного просочування методом накатки є паддинг-машини (валкові машини, барабанні установки). У цьому типі обладнання тканину пропускають через відкритий резервуар з імпрегнатом, а потім між двома або трьома прижимними валками. Утворюється «воротний» або «рулонний» хвіст тканини. Нип (зазор між валками) зазвичай 5–6 мм, що забезпечує високе водовбирання (часто 80–100% від маси тканини). Паддинг використовується при невисоких швидкостях (десятки м/хв) і забезпечує контрольований рівень просочення за рахунок регулювання зазору і швидкості подачі.

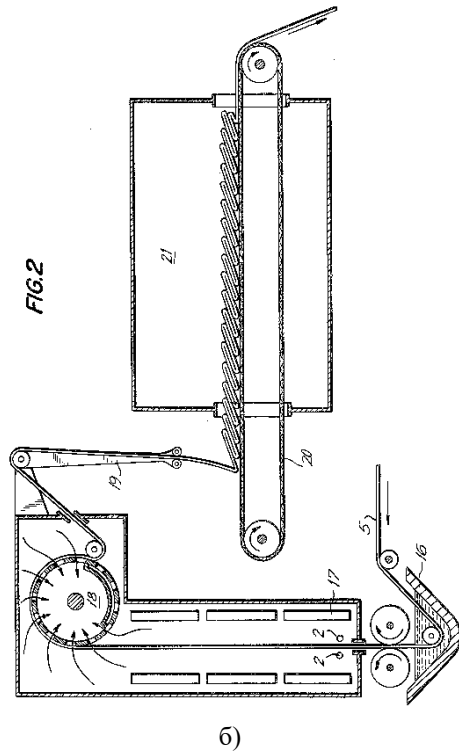
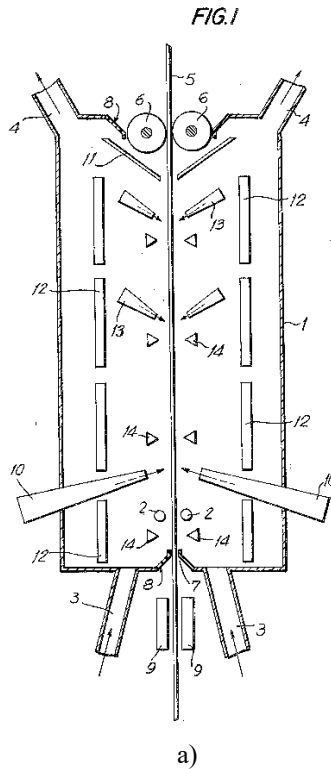
Існують також закриті циліндричні установки, де тканину намотують або пропускають навколо перфорованого або суцільного обертового барабана з імпрегнатом. Після нанесення розчину нагрівають барабан (масляні труби, ІЧ-промені, гарячий повітряний потік), щоб випарувати розчинник або висушити тканину. В патенті [2] описано процес, де тканину просочують на барабані, а потім сушать безпечним "згорянням" легкозаймистого розчинника: барабан (або побічні нагрівальні

елементи) підігрівають матеріал над температурами займання імпрегнату (напр., ІЧ-випромінюванням чи полум'ям). Це дає швидке видалення розчинника і рівномірне висушування. В сучасних барабанних сушарках додаткові ІЧ-елементи чи гарячі потоки забезпечують ефективне відведення вологи незалежно від вмісту води в оброблюваному розчині.

Класичні приклади технологічного устаткування, що використовуються при цьому методі імпрегнування наведені на рисунках 1 та 2 [2, 4].

U.S. Patent Sept. 30, 1975 Sheet 1 of 4 3,909,196

U.S. Patent Sept. 30, 1975 Sheet 2 of 4 3,909,196



U.S. Patent Sept. 30, 1975 Sheet 3 of 4 3,909,196

U.S. Patent Sept. 30, 1975 Sheet 4 of 4 3,909,196

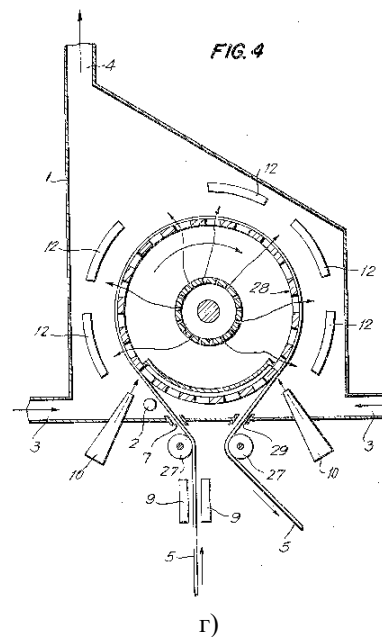
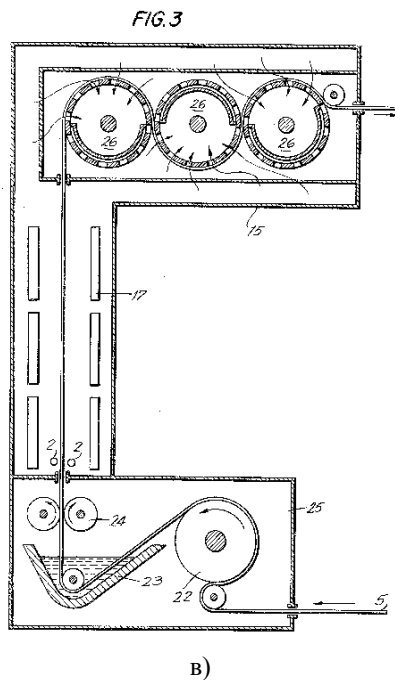


Рис. 1. Спосіб та пристрій для просочування і сушіння текстильних матеріалів [4]: а) – сушильне обладнання для текстильних матеріалів; б) – інтеграція сушильної камери зі стандартними текстильними агрегатами для комплексної обробки матеріалів; в) – технологічна лінія для просочування та термообробки текстилю; г) – модифікована версія лінії для просочування з перфорованим барабаном та односторонньою термообробкою

У патенті [4] (рис. 1) описано процес і пристрій для імпрегнації та сушіння текстильних матеріалів, у якому тканину занурюють у ванну з робочим середовищем, що містить легкозаймисту органічну рідину (наприклад метанол чи циклічні етери), а після нанесення функціонального агента (барвника, модифікатора) матеріал сушать шляхом спалювання цієї рідини безпосередньо на виробі. Такий підхід дозволяє істотно знизити витрати енергії на випаровування, скоротити час обробки та забезпечити рівномірне проникнення речовини до волокон, при цьому оптимізуючи співвідношення органічного розчинника і води для запобігання самозаймання та пошкодження тканини. У патенті описано установку для імпрегнації й сушіння тканин, що складається з кількох послідовних секцій: спочатку матеріал прокатується через ванну-імпрегнатор із обтискними вальцями для рівномірного нанесення робочого середовища (легкозаймистого органічного розчинника з барвником чи модифікатором), далі тканину охолоджують у зоні підтримки температури трохи нижче її точки спалаху, після чого конвеєром подають у тунель із вбудованими пальниками чи розпилювачами для підпалювання розчинника та його повного згоряння на поверхні виробу, що одночасно забезпечує висихання й фіксацію агента, а відпрацьовані гази відводяться вентиляційною системою; така конструкція дозволяє знизити енергоспоживання, скоротити час обробки та досягти глибокого проникнення речовини в волокна при мінімальній модернізації існуючих ліній обробки текстилю. Винахід простий у реалізації на існуючих лініях обробки текстилю й універсальний для різних типів волокон.

Патент [2] (рис. 2) описує класичний метод простого занурення нитки в імпрегуючий розчин. В патенті описано механізований спосіб просочування текстилю за допомогою системи послідовного занурення матеріалу у ванну з імпрегуючим розчином (наприклад, вогнезахисним або гідрофобним агентом) з подальшим віджимом надлишку рідини пневматичним методом (дутьтя за допомогою пневмофорсунок 8 та 21 – рис. 2) на натяжних валиках, де ключовим технологічним рішенням є синхронізація швидкості руху тканини з тиском пневматичного віджиму для досягнення рівномірного розподілу реагентів по всій поверхні без ручних операцій, що стало основою для сучасних промислових ліній (наприклад, Bianco® INNO-PAD [5]) та дозволило масштабувати обробку текстилів при збереженні якості покриття, особливо для тонких і середньої товщини матеріалів.

Oct. 24, 1939. S. L. KIRKENDALL 2,177,323  
 METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING THE IMPREGNATION OF TEXTILES  
 Filed Oct. 7, 1937

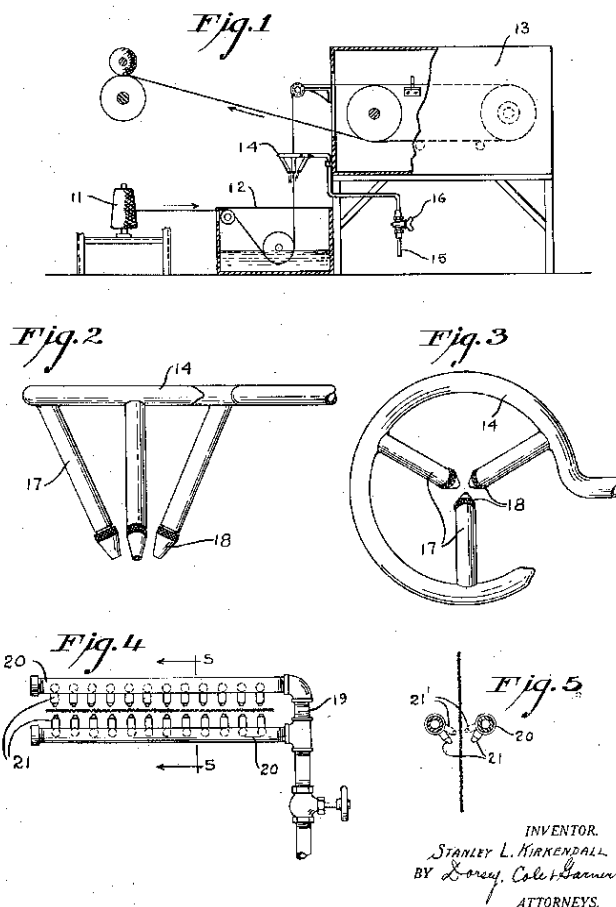


Рис. 2. Спосіб та апарат для контролю просочення текстильних виробів [2]

**Метод пін-апретури** є спеціалізованою технологією імпрегнації, що використовує унікальний принцип нанесення. Його суть полягає в попередньому перетворенні імпрегуючого розчину у стабільну, однорідну піну за допомогою спеціальних піноутворювачів та обладнання. Ця піна наноситься рівномірним шаром на одну або обидві сторони тканини (часто за допомогою ракеля або ножів), після чого вона руйнується – або фізично (механічним впливом), або в результаті контакту з волокнами, звільняючи активні речовини безпосередньо на поверхні матеріалу.

Головною перевагою цього методу є кардинально низький рівень вологопоглинання тканиною порівняно з іншими способами просочення. Оскільки матеріал контактує з піною, а не з рідким розчином, він залишається практично сухим після нанесення. Це призводить до значної економії енергії на подальшому етапі сушіння, що є ключовою економічною перевагою. Крім того, технологія дозволяє наносити відносно велику кількість активного реагенту з мінімальним його проникненням у глибину тканини, що ідеально підходить для створення виразних поверхневих ефектів без зміни об'ємних властивостей матеріалу.

Проте, метод має важливі технологічні обмеження. Основним недоліком є складність контролю стабільності піни протягом усього процесу; її консистенція, розмір бульбашок та час життя повинні бути суворо витримані для забезпечення рівномірності обробки. Це вимагає використання спеціалізованого, часто дорогого обладнання (піногенератори, прецизійні аплікатори) та ретельного підбору рецептури розчину. Найсуттєвішим технічним обмеженням є непридатність методу для глибокого просочування товстих матеріалів, оскільки активні речовини залишаються переважно на поверхні волокон.

Сфера застосування пін-апретури визначається її здатністю надавати інтенсивні поверхневі властивості при мінімальному впливі на структуру тканини. Метод широко використовується для нанесення апретивів, що надають м'якість або "повноти" на дотик, особливо на вовняних або трикотажних виробках. Він ефективний для створення гідрофобних бар'єрів на лицьовій поверхні тканин без їх повного просочення. Його застосовують для легкого вогнезахисного захисту, де достатньо поверхневого впливу, а також для апретури килимів та килимових покриттів, де важливо зберегти об'єм та пружність основи, наносячи хімію лише на ворс.

Патент [12] описує спосіб обробки текстильних матеріалів за допомогою піни, що дозволяє рівномірно наносити барвники чи інші хімічні реагенти без утворення надлишкової рідини. Замість традиційного занурення тканини у великий об'єм робочого розчину, запропоновано формувати пінисту суміш, котра містить лужний компонент, миючий засіб і, за потреби, органічний розчинник або барвник, а потім рівномірно розподіляти цю піну на поверхні тканини всередині закритої камери. Після витримки певного часу піну здувають або руйнують, а тканину промивають невеликою кількістю води. Такий підхід забезпечує значну економію води та хімікатів, поліпшує проникнення барвника у волокна і зменшує витрати енергії та стічних вод у порівнянні з традиційними методами обробки.

Автори роботи [13] описують впровадження та еволюцію використання системи FFT (Foam Finishing Technology) для обробки тканин (зокрема котону, джинса та тканин для форменого одягу), яка дозволяє послідовно наносити смоли та пом'якшувачі на лицьовий бік і зв'язувальні засоби на зворотний бік без проміжного сушіння. Використання подвійної головки та подвійного подавання забезпечує точний контроль над кількістю нанесених хімікатів, а можливість «мокрого на мокро» нанесення дозволяє значно зменшити витрати енергії й хімікатів, підвищити продуктивність і забезпечити швидке повернення інвестицій. Крім того, FFT-процес сприяє покращенню якості тканин за рахунок більшої об'ємності та бажаного відчуття поверхні матеріалу.

**Вакуумне просочування** матеріалів є одним з найпоширеніших методів імпрегнування текстильних матеріалів. Матеріал поміщають у вакуумну камеру і створюють розрідження, що видаляє повітря з пор волокон. Потім камера вентилується або в неї подають рідину під тиском. Різниця тисків забезпечує глибоке проникнення імпрегнатів.

В промисловості використовують вакуумні імпрегнаційні установки з двома чи більше барними (шарнірними) роликками для герметизації ходу тканини. Наприклад, патент [3] описує вакуумну камеру з парно притиснутими роликками і герметичними стінками, через які тканина безперервно проходить під час вакуумної обробки. Комерційна система Bianco INNO-PAD має нержавіючий резервуар з двома вакуумними планками (слюверами) для рівномірного відведення повітря та нижнє тископриводне валкове переминання (падер). У баку також передбачено підігрів (паром) для поліпшення проникнення.

Вакуумна обробка часто поєднується з обробкою під надлишковим тиском. Яскравим прикладом є класична вакуумно-тампажна технологія, що застосовується для знебарвлення або фарбування ниток [7]. У дослідному зразку (вагою 50 фунтів) спочатку створювали вакуум у спеціальному пакеті з рівнем приблизно 26–28 дюймів ртутного стовпа (Hg) (що відповідає ~91–94% повного вакууму). Наступним етапом було занурення зразка у фарбувальний розчин та застосування надлишкового тиску приблизно 10–20 фунтів на квадратний дюйм (psi) або 0,7–1,4 бар при температурі близько 200°F (≈93°C). За цих умов відбувалося імпрегування (насичення) волокон фарбником. Зокрема, в описаному прикладі процес барботажу (продування) розчину крізь шар спочатку сухих ниток займав близько 23 секунд. Основна стадія екстракції барвника (або його фіксації) тривала 30



хвилин при підтримці температури 200°F та тиску в діапазоні 10–20 psi [7].

Така процедура забезпечила глибоке й однорідне просочення. В описаному досліді досягнуто "важкої" масової прибавки тканини, тобто великий вміст речовини у волокнах при рівномірній фарбувальній щільності. Вакуумне просочування суттєво перевищує можливості простого занурення в плані проникнення рідини та однорідності прошарку.

У патенті [7] (рис. 3) описано процес, який передбачає пакетну обробку текстильних матеріалів (наприклад, мотків пряжі, необроблених волокон, трикотажних виробів, манжеток тощо) у закритій камері шляхом створення вакууму, а потім швидкого подавання обробного агента (фарби або миючих засобів) під тиском із зовнішньої зони. Завдяки різниці тисків реагент практично одразу рівномірно проникає крізь усі шари матеріалу, забезпечуючи однорідне покриття поверхні та збереження початкової концентрації й властивостей реагента, що дозволяє поєднати кілька операцій обробки в єдиному циклі.

U.S. Patent Aug. 17, 1976 Sheet 1 of 2 3,974,534

U.S. Patent Aug. 17, 1976 Sheet 2 of 2 3,974,534

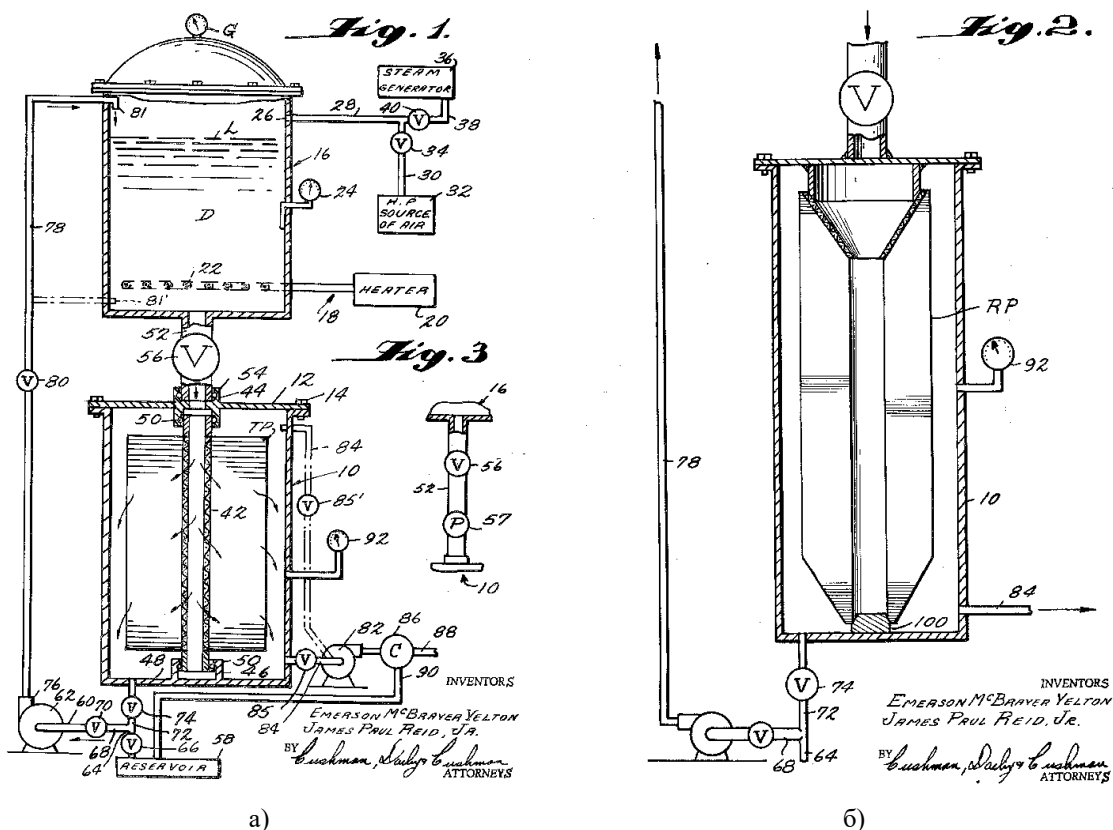


Рис. 3. Спосіб вакуумної обробки текстильних матеріалів [3]: а) – апарат для обробки пакунків пряжі на трубчастій основі та модифікація для пакунків з ракетною намоткою; б) – система подачі реагенту.

Сучасні дослідження в галузі просочування тканин демонструють значний інтерес до **вібраційного методу** як ефективного засобу покращення проникнення рідин у порожнини матеріалів. Теоретичні роботи вказують на те, що вібраційні коливання генерують додатковий вібраційний тиск ( $P_3$ ), який суттєво впливає на динаміку процесу. Цей тиск залежить від амплітуди ( $A$ ) та частоти ( $f$ ) коливань, що описується формулою  $P_3 = k \cdot \rho \cdot f^2 \cdot A^2$ , де  $k$  – емпіричний коефіцієнт. Експериментально доведено, що збільшення цих параметрів призводить до зростання глибини просочування, що підтверджують графічні залежності приведені авторами роботи [14, рис. 3, 18, 3, 19]. Наприклад, при частоті 20 кГц та амплітуді 20 мкм спостерігається оптимальне поєднання енергоефективності та продуктивності.

Важливу роль у механізмі вібраційного просочування відіграє взаємодія капілярного, гідростатичного та імпульсного тисків. Наведені авторами математичні моделі, такі як модифікована формула Пуазейля, дозволяють прогнозувати глибину проникнення рідини з урахуванням в'язкості, часу та геометрії пор. Автори роботи наголошують, що проаналізована ними наукова література підкреслює вплив структури пухирців газу в рідині на поширення ударних хвиль, які сприяють витісненню повітря з пор тканин.

Порівняльний аналіз методів просочування показав, що вібраційний метод має низку переваг перед традиційними способами. На відміну від статичного занурення, він забезпечує більш повне заповнення пор за рахунок динамічного впливу, а у порівнянні з вакуумним або ультразвуковим

методами – менші енерговитрати, особливо при роботі в резонансному режимі. Окрім того, технологія дозволяє реалізувати обладнання прохідного типу, що критично важливо для масового виробництва [14].

Проте ключовим викликом залишається оптимізація параметрів коливань (амплітуди, частоти, форми хвилі) для різних типів тканин. Дослідження пропонують використовувати гідродинамічні моделі з урахуванням в'язкопружних властивостей середовищ для точнішого прогнозування результатів. Таким чином, вібраційний метод просочування є перспективним напрямком, який поєднує теоретичну глибину з практичною ефективністю.

Одним з перспективних методів просочування текстильних матеріалів є технологія, що базується на використанні **кавітаційних процесів**, що створюються ультразвуковим випромінюванням. Ультразвукові хвилі (28–40 кГц) створюють кавітаційні ефекти у рідині, що "пробивають" волоконну структуру й забезпечують більш глибоку й рівномірну дифузю імпрегнантів в просочуваний матеріал. Для обробки використовують ультразвукові ванни (коритця) або зонди (гуркітні випромінювачі).

В патенті [9] описано принцип ультразвукового просочування матеріалів. В методі «sonochemical impregnation» тканину розміщують в імпрегнантній суміші та опромінують ультразвуковим ріжком. За патентом [9] використовували Ті-зонд на 20 кГц, потужністю ~1,5 кВт (70% корисної потужності) при 30°C протягом 1 год. Аналогічні установки зазвичай працюють у діапазоні частот 20–40 кГц.

Така обробка дозволяє отримати надзвичайно рівномірне покриття волокон наночастинками. Наприклад, у вказаному патенті на поверхнях бавовни осаджено ZnO-наночастинки (~150 нм) з однорідним розподілом по всій товщині тканини. Ультразвукове просочування демонструє явну перевагу над звичайним зануренням, забезпечуючи більшу глибину проникнення і скорочуючи час обробки без руйнування волокон.

У порівнянні з класичними методами [2, 4] ультразвукові та вакуумні методи значно скорочують час і підвищують однорідність просочення, проте, відсутність дослідних даних для широкого спектру матеріалів та параметрів ультразвукового випромінювання в процесі імпрегнування породжують необхідність в експериментальному дослідженні цього методу, що в свою чергу дозволить визначити його ефективність застосування для обробки різних типів матеріалів. Також, існує необхідність в дослідженні ефективності методу для різних цілей імпрегнування.

**Плазмова обробка** текстильних матеріалів передбачає вплив на поверхню волокон іонізованим газом (плазмою), що створює на тканині активні радикали та функціональні групи без використання рідких реагентів, подібно до «сухого імпрегнування». У процесі тканину пропускають через плазмовий розряд (вакуумний, атмосферний або діелектрично-бар'єрний), де енергія електричного поля руйнує молекули газу, утворюючи електрони, йони та вільні радикали, що модифікують поверхневі властивості волокон. Як наслідок, тканина набуває підвищеної здатності зв'язувати водовідштовхувальні, антимікробні чи інші функціональні сполуки без попереднього занурення у розчин, а при використанні плазмової полімеризації на поверхні утворюється тонкий плівковий шар. Така технологія забезпечує мінімальне споживання води, рівномірність нанесення, покращену адгезію та скорочення часу обробки порівняно з традиційними методами рідинного імпрегнування.

У патенті [15] запропоновано спосіб обробки текстильних матеріалів плазмою для покращення адгезії барвників (фарбувальних реагентів) до волокон, що забезпечує рівномірне та глибоке фарбування при зниженому споживанні води й хімікатів. Процес включає створення плазми (атмосферного чи низького тиску) у безпосередній близькості до текстильної поверхні з наступним нанесенням барвника, причому активовані плазмою ділянки волокон сприяють кращому зв'язуванню барвника й підвищенню міцності кольору. Крім того, винахід передбачає варіанти виконання у безперервному виробничому циклі, що дозволяє скоротити тривалість обробки та енерговитрати порівняно з традиційними методами фарбування.

Патент [16] пропонує спосіб надання водовідштовхувальних властивостей текстильним матеріалам шляхом обробки їх у низькотисковій плазмі з використанням плазмової полімеризації або атомно-шарового осадження. Тканину поміщають у камеру, створюють вакуум (10–15 мТ), після чого подають у камеру перфтороктилбромідний мономер (10–50 sccm) та гелій для стабілізації плазми, витримуючи обробку 30–120 хв. В результаті на поверхні волокон утворюється тонка (< 250 нм) гідрофобно-оліофобна плівка, яка зберігає первинну повітропроникність і не погіршує тактильних властивостей тканини, забезпечуючи багатогранний водо- й жировідштовхувальний ефект без екологічного навантаження традиційних методів фарбування та просочення.

У статті [17] розглядається застосування холодної плазми для модифікації поверхні текстильних матеріалів (натуральних та синтетичних), яке дозволяє досягнути трьох основних ефектів: очищення поверхні, збільшення мікрошорсткості (наприклад, антипілінгове оздоблення вовни) та утворення активних радикалів для створення гідрофільних або гідрофобних властивостей. Авторка описує як у низькотискових, так і атмосферних розрядах можна контролювати нанесення функціональних груп (ОН, СООН, NH<sub>2</sub> тощо), що підвищує адгезію фарбників і покриттів без впливу

на основні механічні властивості тканин. Крім того, висвітлено можливості плазмової полімеризації, коли на поверхні волокон осаджуються тонкі плівки з бажаними характеристиками – гідрофільними, гідрофобними чи брудовідштовхувальними – та обговорено прикладні системи (корона-розряд, атмосферний світловий розряд) для промислового впровадження, що сприяє скороченню витрат енергії, води та хімікатів у порівнянні з традиційними процесами обробки текстилю.

Проаналізувавши переважну більшість сучасних методів та технологічного устаткування для імпрегнування текстильних матеріалів можна стверджувати, що існує перспектива в комбінації різних методів імпрегнування матеріалів, наприклад вакуумно-кавітаційне просочування або ж електрофоретичне осадження.

**Електрофоретичне осадження** при імпрегнуванні текстильних матеріалів [18] передбачає занурення тканини у колоїдний розчин із зарядженими частинками (наночастинки оксидів металів, полімери, барвники, функціональні добавки) та прикладання до неї електричного поля: під дією різниці потенціалів позитивно та/або негативно заряджені іони рухаються до протилежного електрода, осідаючи на поверхні волокон і утворюючи рівномірне покриття. Такий метод дозволяє нанести тонкі й однорідні шари функціональних матеріалів глибоко в структуру текстилю, забезпечуючи високу адгезію та контроль товщини покриття, при цьому витрати розчину мінімізуються і скорочується час обробки порівняно з класичним зануренням чи розпиленням. ЕРД-імпрегнація застосовується для надання тканинам антибактеріальних, протипожежних, антистатичних, гідрофобних або інфрачервоних властивостей без необхідності використання високих температур чи агресивних хімікатів.

Проаналізувавши існуючі методи імпрегнування матеріалів та технологічне устаткування було сформовано дворівневу класифікацію та розроблено блок схему, що наведено на рисунку 4.

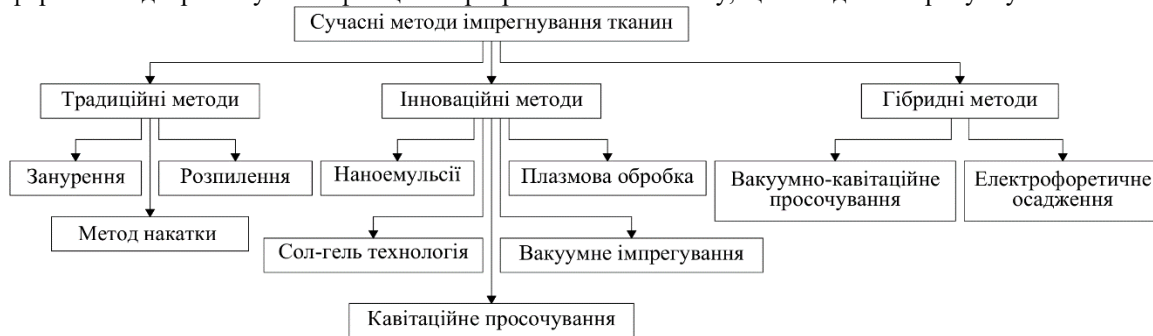


Рис. 4. Класифікація методів імпрегнування текстильних матеріалів

Виходячи з вище приведених даних, найперспективнішими напрямками, здатними подолати описані обмеження класичних методів, є:

- метод ультразвукової кавітації: Використання енергії ультразвуку для генерації мікроскопічних бульбашок (кавітаційних порожнин), які, схлопуючись, створюють інтенсивні мікроударні хвилі та мікропотоки. Це сприяє розпушуванню волокон, розширенню пор, руйнуванню повітряних пробок та інтенсифікації дифузії реагенту вглиб матеріалу.

- вакуумне просочування: Застосування вакууму для видалення повітря з пористої структури текстилю перед або під час занурення в імпрегуючий розчин. Різниця тисків призводить до примусового заповнення пор рідиною, забезпечуючи глибоке просочування імпрегнату.

- застосування наноемульсій: Використання спеціальних емульсій з нанорозмірними частками, що володіють підвищеною здатністю проникати в дрібні пори та капіляри завдяки малим розмірам і високій поверхневій активності.

- плазмова модифікація поверхні: Попередня обробка матеріалу низькотемпературною плазмою для активації поверхні, поліпшення її змочуваності та адгезії, що підвищує ефективність подальшого просочування будь-яким методом.

Ці технології мають потенціал не лише вирішити проблему глибини та рівномірності просочування, але й забезпечити скорочення часу обробки, зменшення витрати хімікатів, збереження якості матеріалу та підвищення екологічності процесу, що є критично важливим для їх промислового застосування.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В ході дослідження сучасних методів імпрегнування було розроблено універсальну класифікацію та здійснено порівняльний аналіз ефективності просочування матеріалів

Видокремлено позитивні та негативні сторони кожного методу, приведено сфери застосування та комбінування методів в технологічних послідовностях виробництва, що дозволить ефективно підбирати методи імпрегнування з залежності від технологічних потреб та цілей обробки текстильних матеріалів.

Серед розглянутих способів просочення матеріалів виокремлено ряд перспективних технологій які вирізняються своєю ефективністю та придатністю до масштабування технології та

адаптації до промислових масштабів.

Одним із найперспективніших напрямків розвитку технологій імпрегування текстильних матеріалів є кавітаційний метод, який вирізняється своєю простотою та ефективністю, окрім того аналітичний огляд продемонстрував, що даний метод має високий рівень відповідності до сучасних вимог та стандартів.

Для подальшого вдосконалення методу варто: оптимізувати параметри ультразвукової обробки (частота, потужність, час); дослідити комбінацію кавітації з інноваційними вогнезахисними речовинами; провести тестування механічної міцності матеріалів після обробки для оцінки довгострокової ефективності. Кавітаційне просочування може стати стандартом для галузей, де потрібне глибоке та рівномірне імпрегування, таких як авіація, будівництво та виробництво спеціального одягу.

### Література

1. Repon M. R., Islam T., Sadia H. T., Mikučionienė D., Hossain S., Kibria G., Kaseem M. Development of antimicrobial cotton fabric impregnating AgNPs utilizing contemporary practice // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Article No. 1413. – URL: <https://doi.org/10.3390/coatings11111413> (date of access: 25.05.2025).
2. Method and apparatus for controlling the impregnation of textiles : U.S. Patent No. 2,177,323. – Patented Oct. 24, 1939. – Washington, DC : U.S. Patent and Trademark Office. – 6 p. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d3/d9/7f/82b379127ef871/US2177323.pdf> (date of access: 01.06.2025).
3. Patent DE 2253966 A1 (Germany), Noethiger O. Device for impregnating a textile track / Ciba Geigy AG. – 1974. – Published 11.04.1974. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE2253966A1/en> (accessed: 01.06.2025).
4. Process and device for the impregnation and drying of textile material [Електронний ресурс] : пат. US 3909196 A / винахідники Walter BirkeDer Eltz, Hans-Ulrich VonFranz, Schon ; заявник BRUCKNER TROCKENTECHNIK & Co KG. – США. – Опубл. 30.09.1975. – № US 3909196 A. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US3909196A/en> (дата звернення: 08.05.2025).
5. Bianco® INNO-PAD impregnation padder [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.directindustry.com/prod/bianco/product-138711-2622041.html> (дата звернення: 08.05.2025).
6. Horrocks A. R., Price D. Fire Retardant Materials. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2001. – 448 p. – ISBN 978-1-85573-419-7.
7. Process for vacuum treatment of textile materials [Електронний ресурс] : пат. US 3974534 A / винахідники Emerson McBrayer Yelton, James Paul Reid Jr. ; заявник Burlington Industries Inc. – США. – Опубл. 17.08.1976. – № US 3974534 A. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US3974534A/en> (дата звернення: 08.05.2025).
8. Сюй Вейлін, Цао Генъян, Лю Сін. Спосіб вогнезахисної обробки текстильних матеріалів [Електронний ресурс] : пат. CN 102505391 B / винахідники 杨庆祥, 杨育林, 齐效文, 范兵利, 张青梅 ; заявник Yanshan University. – Китай. – Опубл. 04.09.2013. – № CN 102505391 B. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/CN102505391B/en> (дата звернення: 08.05.2025).
9. Gedanken A., Nitzan Y., Perelshtein I., Perkas N., Applerot G. Sonochemical coating of textiles with metal oxide nanoparticles for antimicrobial fabrics [Електронний ресурс] : пат. US 9315937 B2 / винахідники Aharon Gedanken, Yeshayahu Nitzan, Piana Perelshtein, Nina Perkas, Guy Applerot ; заявник Bar Ilan University. – США. – Опубл. 19.04.2016. – № US 9315937 B2. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US9315937B2/en> (дата звернення: 08.05.2025).
10. Braunecker L., Ehlert T.D., Fedel T., Janssen R.A., Macdonald J.G., McNichols P.S., Smith R.C. Jr. Process for applying one or more treatment agents to a textile web [Електронний ресурс] : пат. WO 2009083876 A3 / винахідники Laura Braunecker, Thomas David Ehlert, Tony Fedel, Robert Allen Janssen, John Gavin Macdonald, Patrick Sean McNichols, Roland C. Smith Jr. ; заявник Kimberly-Clark Worldwide, Inc. – WIPO (PCT). – Опубл. 24.09.2009. – № WO 2009083876 A3. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/WO2009083876A3/en> (дата звернення: 08.05.2025).
11. Malucelli Giulio. Sol-Gel and Layer-by-Layer Coatings for Flame-Retardant Cotton Fabrics: Recent Advances / Giulio Malucelli // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 333. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/coatings10040333> (дата звернення: 08.05.2025).
12. Walter A.T., Bryant G.M., Readshaw R.L. Process of treating fabrics with foam: пат. США US4562097A / винахідники Andrew T. Walter, George M. Bryant, Ronald L. Readshaw; заявник Union Carbide Corp. – США. – Опубл. 09.01.1986. – № US4562097A. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US4562097A/en> (дата звернення: 08.05.2025).
13. Baker K.L., Bryant G.M., Kelsey W.B. Foam Finishing Technology // *Journal of the Textile Institute*. — 1982. — Vol. 52, No. 6. — P. 231–240. — <https://doi.org/10.1177/004051758205200607> (дата звернення: 08.05.2025).
14. Сілін Р. І., Гордеев А. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора : монографія / Р.

I. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.

15. Plasma treatments for coloration of textiles [Електронний ресурс] : пат. WO2015088920A1 / винахідники Justin Lee Gladish, Mary-Ellen Smith, Graham C. Page; заявник The North Face Apparel Corp. – WIPO (PCT). – Опубл. 18.06.2015. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/WO2015088920A1/en> (дата звернення: 01.06.2025).

16. Nano plasma waterproof treatment method for textiles [Електронний ресурс] : пат. CN104179011A / винахідники 闫勇, 俞裕波, 秦志强; заявник QINGDAO TEXTILES HOLDING GROUP CO Ltd. – Китай. – Опубл. 24.08.2016. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/CN104179011A/en> (дата звернення: 01.06.2025).

17. Sparavigna A. C. Plasma treatments for textiles: an innovative technology for traditional and technical fabrics / A. C. Sparavigna // Polytechnic University of Turin. – Jan. 2002. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/236619805\\_Plasma\\_treatments\\_for\\_textiles\\_an\\_innovative\\_technology\\_for\\_traditional\\_and\\_technical\\_fabrics](https://www.researchgate.net/publication/236619805_Plasma_treatments_for_textiles_an_innovative_technology_for_traditional_and_technical_fabrics) (дата звернення: 01.06.2025).

18. Kimbrell W. C., Jr., Kuhn H. H. Electrically conductive textile materials and method for making same : patent CA1330024C / W. C. Kimbrell, Jr., H. H. Kuhn; Milliken Research Corp. – Canada. – No CA1330024C; заявл. 11.07.1988; опубл. 07.06.1994. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/CA1330024C/en> (дата звернення: 01.06.2025).

### References

1. Repon M. R., Islam T., Sadia H. T., Mikučionienė D., Hossain S., Kibria G., Kaseem M. Development of antimicrobial cotton fabric impregnating AgNPs utilizing contemporary practice // Coatings. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Article No. 1413. – URL: <https://doi.org/10.3390/coatings1111413> (date of access: 25.05.2025).

2. Method and apparatus for controlling the impregnation of textiles : U.S. Patent No. 2,177,323. – Patented Oct. 24, 1939. – Washington, DC : U.S. Patent and Trademark Office. – 6 p. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d3/d9/7f/82b379127ef871/US2177323.pdf> (date of access: 01.06.2025).

3. Patent DE 2253966 A1 (Germany), Noethiger O. Device for impregnating a textile track / Ciba Geigy AG. – 1974. – Published 11.04.1974. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE2253966A1/en> (accessed: 01.06.2025).

4. Process and device for the impregnation and drying of textile material [Elektronnyi resurs] : pat. US 3909196 A / vynakhidnyky Walter BirkeDer Eltz, Hans-Ulrich VonFranz, Schon; zaiavnyk BRUCKNER TROCKENTECHNIK & Co KG. – SShA. – Opubl. 30.09.1975. – № US 3909196 A. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/US3909196A/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

5. Bianco® INNO-PAD impregnation padder [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.directindustry.com/prod/bianco/product-138711-2622041.html> (data zvernennia: 08.05.2025).

6. Horrocks A. R., Price D. Fire Retardant Materials. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2001. – 448 p. – ISBN 978-1-85573-419-7.

7. Process for vacuum treatment of textile materials [Elektronnyi resurs] : pat. US 3974534 A / vynakhidnyky Emerson McBrayer Yelton, James Paul Reid Jr.; zaiavnyk Burlington Industries Inc. – SShA. – Opubl. 17.08.1976. – № US 3974534 A. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/US3974534A/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

8. Siui Veilin, Tsao Henian, Liu Sin. Sposib vohnezakhysnoi obrobky tekstylnykh materialiv [Elektronnyi resurs] : pat. CN 102505391 B / vynakhidnyky 杨庆祥, 杨育林, 齐效文, 范兵利, 张青梅; zaiavnyk Yanshan University. – Kytai. – Opubl. 04.09.2013. – № CN 102505391 B. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/CN102505391B/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

9. Gedanken A., Nitzan Y., Perelshtein I., Perkas N., Applerot G. Sonochemical coating of textiles with metal oxide nanoparticles for antimicrobial fabrics [Elektronnyi resurs] : pat. US 9315937 B2 / vynakhidnyky Aharon Gedanken, Yeshayahu Nitzan, Ilana Perelshtein, Nina Perkas, Guy Applerot; zaiavnyk Bar Ilan University. – SShA. – Opubl. 19.04.2016. – № US 9315937 B2. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/US9315937B2/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

10. Braunecker L., Ehlert T.D., Fedel T., Janssen R.A., Macdonald J.G., Mcnichols P.S., Smith R.C. Jr. Process for applying one or more treatment agents to a textile web [Elektronnyi resurs] : pat. WO 2009083876 A3 / vynakhidnyky Laura Braunecker, Thomas David Ehlert, Tony Fedel, Robert Allen Janssen, John Gavin Macdonald, Patrick Sean Mcnichols, Roland C. Smith Jr.; zaiavnyk Kimberly-Clark Worldwide, Inc. – WIPO (PCT). – Opubl. 24.09.2009. – № WO 2009083876 A3. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/WO2009083876A3/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

11. Malucelli Giulio. Sol-Gel and Layer-by-Layer Coatings for Flame-Retardant Cotton Fabrics: Recent Advances / Giulio Malucelli // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 333. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.3390/coatings10040333> (data zvernennia: 08.05.2025).

12. Walter A.T., Bryant G.M., Readshaw R.L. Process of treating fabrics with foam: pat. SShA US4562097A / vynakhidnyky Andrew T. Walter, George M. Bryant, Ronald L. Readshaw; zaiavnyk Union Carbide Corp. – SShA. – Opubl. 09.01.1986. – № US4562097A. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/US4562097A/en> (data zvernennia: 08.05.2025).

13. Baker K.L., Bryant G.M., Kelsey W.B. Foam Finishing Technology // Journal of the Textile Institute. — 1982. — Vol. 52, No. 6. — P. 231–240. — <https://doi.org/10.1177/004051758205200607> (data zvernennia: 08.05.2025).

14. Silin R. I., Hordieiev A. I. Vibratsiine obladnannia na osnovi hidropulsatora : monohrafiia / R. I. Silin, A. I. Hordieiev. – Khmelnytskyi : KhNU, 2007. – 386 s.

15. Plasma treatments for coloration of textiles [Elektronnyi resurs] : pat. WO2015088920A1 / vynakhidnyky Justin Lee Gladish, Mary-Ellen Smith, Graham C. Page; zaiavnyk The North Face Apparel Corp. – WIPO (PCT). – Opubl. 18.06.2015. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/WO2015088920A1/en> (data zvernennia: 01.06.2025).

16. Nano plasma waterproof treatment method for textiles [Elektronnyi resurs] : pat. CN104179011A / vynakhidnyky 闫勇, 俞裕波, 秦志强; zaiavnyk QINGDAO TEXTILES HOLDING GROUP CO Ltd. – Kytai. – Opubl. 24.08.2016. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/CN104179011A/en> (data zvernennia: 01.06.2025).

17. Sparavigna A. C. Plasma treatments for textiles: an innovative technology for traditional and technical fabrics / A. C. Sparavigna // Polytechnic University of Turin. – Jan. 2002. – Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/236619805\\_Plasma\\_treatments\\_for\\_textiles\\_an\\_innovative\\_technology\\_for\\_traditional\\_and\\_technical\\_fabrics](https://www.researchgate.net/publication/236619805_Plasma_treatments_for_textiles_an_innovative_technology_for_traditional_and_technical_fabrics) (data zvernennia: 01.06.2025).

18. Kimbrell W. C., Jr., Kuhn H. H. Electrically conductive textile materials and method for making same : patent CA1330024C / W. C. Kimbrell, Jr., H. H. Kuhn; Milliken Research Corp. – Canada. – No CA1330024C; zaiavl. 11.07.1988; opubl. 07.06.1994. – Rezhym dostupu: <https://patents.google.com/patent/CA1330024C/en> (data zvernennia: 01.06.2025).