

ЄРІЙ АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

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

СИНЮК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9615-0729>e-mail: oleg.synuk@khmnu.edu.ua

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КАВІТАЦІЙНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуто питання математичного моделювання процесу кавітаційного імпрегнвання текстильних матеріалів у безперервному технологічному циклі. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності просочування текстильних матеріалів функціональними реагентами, забезпечення рівномірного розподілу імпрегнату в структурі матеріалу та створення теоретичної основи для проєктування сучасного автоматизованого обладнання. Для формування математичної моделі розроблено конструкцію ультразвукової кавітаційної імпрегнвальної установки прохідного типу, принцип роботи якої використано як фізичну основу дослідження процесів масопереносу під час кавітаційної обробки. У роботі побудовано комплекс взаємопов'язаних математичних моделей, що описують функціонування установки та процес насичення текстильного матеріалу імпрегнатом. Зокрема, сформовано моделі переміщення текстильного полотна через зону ультразвукової обробки, стабілізації його натягу, процесу намотування матеріалу, енергетичних характеристик установки, а також модель розподілу інтенсивності ультразвукового поля в робочому середовищі. На основі аналізу фізичних закономірностей процесу отримано диференціальне рівняння накопичення імпрегнату в структурі текстильного матеріалу та виконано його інтегрування, що дозволило отримати інтегральну математичну модель процесу кавітаційного імпрегнвання. Запропонована модель враховує інтенсивність ультразвукового впливу, тривалість перебування матеріалу в зоні обробки, відстань до ультразвукових випромінювачів, швидкість транспортування полотна, стабільність його переміщення та фізичні характеристики текстильного матеріалу. Аналіз отриманих залежностей показав, що ефективність процесу визначається сукупним впливом конструктивних і технологічних параметрів установки. Розроблена математична модель може бути використана для прогнозування результатів кавітаційного імпрегнвання, оптимізації конструктивних параметрів обладнання та вибору раціональних режимів роботи ультразвукових імпрегнвальних установок.

Ключові слова: кавітаційне імпрегнвання, ультразвукова кавітація, текстильні матеріали, імпрегнвальна установка, математичне моделювання, автоматизація технологічних процесів, просочування текстильних матеріалів.

YERII ANDRII, SYNIUK OLEH

Khmelnyskyi National University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CAVITATION IMPREGNATION PROCESS OF TEXTILE MATERIALS

The paper presents the mathematical modeling of the cavitation impregnation process for textile materials under continuous production conditions. The relevance of the research is associated with the need to improve the efficiency of textile impregnation with functional reagents, ensure their uniform distribution throughout the material structure, and establish a theoretical foundation for the design of modern automated processing equipment. To develop the mathematical model, a continuous-type ultrasonic cavitation impregnation unit was designed, and its operating principle was used as the physical basis for investigating mass transfer phenomena occurring during cavitation treatment. A comprehensive system of interconnected mathematical models describing both the operation of the impregnation unit and the impregnation process itself was developed. In particular, mathematical models were formulated for the transportation of the textile web through the ultrasonic treatment zone, web tension stabilization, roll winding dynamics, the energy characteristics of the installation, and the distribution of ultrasonic field intensity within the working medium. Based on the analysis of the physical mechanisms governing the process, a differential equation describing the accumulation of the impregnating agent within the porous structure of the textile material was derived and subsequently integrated, resulting in an integral mathematical model of the cavitation impregnation process. The proposed model accounts for the intensity of ultrasonic exposure, the residence time of the material within the treatment zone, the distance between the textile material and the ultrasonic transducers, the transportation speed of the textile web, the stability of its movement, and the physical properties of the textile material. Analysis of the obtained mathematical relationships demonstrated that the efficiency of cavitation impregnation is determined by the combined influence of the installation's design parameters and operating conditions. The developed mathematical model can be applied to predict the performance of the cavitation impregnation process, optimize the design parameters of the equipment, and determine rational operating modes for ultrasonic cavitation impregnation systems.

Keywords: cavitation impregnation, ultrasonic cavitation, textile materials, impregnation system, mathematical modeling, process automation, textile material impregnation.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.08.2026

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/)

© Єрій Андрій, Синюк Олег

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток текстильної промисловості характеризується постійним зростанням вимог до функціональних властивостей матеріалів, їх якості, довговічності та відповідності спеціалізованим умовам

експлуатації. Для надання текстильним матеріалам необхідних експлуатаційних характеристик широко застосовуються технології імпрегнування, які забезпечують насичення структури матеріалу функціональними речовинами, зокрема антипіренами, гідрофобізаторами, антимікробними сполуками, барвниками та іншими активними компонентами. Ефективність таких технологій значною мірою визначає якість готової продукції та рівень її конкурентоспроможності [1].

Водночас існуючі технологічні процеси імпрегнування та обладнання для їх реалізації не завжди забезпечують достатню глибину проникнення імпрегнатів у структуру текстильного матеріалу, рівномірність розподілу активних речовин по всій товщині полотна та раціональне використання технологічних розчинів. Особливо актуальною ця проблема є під час обробки щільних або багатошарових текстильних матеріалів, де ефективність традиційних способів просочування суттєво знижується. Крім того, значна частина існуючого обладнання характеризується високою енергоємністю процесів та обмеженими можливостями автоматизації.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності процесів імпрегнування є використання ультразвукової кавітації. Кавітаційні явища сприяють інтенсифікації процесів масопереносу між робочим розчином і текстильним матеріалом, підвищують проникну здатність імпрегнатів та створюють передумови для зменшення витрат реагентів і тривалості обробки. Разом із тим питання створення спеціалізованого технологічного обладнання, здатного реалізувати переваги ультразвукової кавітації в умовах безперервного промислового виробництва текстильних матеріалів, залишається недостатньо опрацьованим [2].

У зв'язку з цим актуальним науково-практичним завданням є розробка конструкції та принципів функціонування ультразвукової кавітаційної імпрегнувальної установки, яка забезпечуватиме ефективне проникнення функціональних реагентів у структуру текстильних матеріалів, стабільність технологічних параметрів процесу, високий рівень автоматизації та енергоефективності виробництва. Розв'язання зазначеного завдання сприятиме подальшому розвитку технологій модифікації текстильних матеріалів та створенню нового покоління обладнання для їх промислової обробки.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення математичної моделі роботи ультразвукової кавітаційної імпрегнувальної установки безперервної дії та дослідження закономірностей процесу кавітаційного імпрегнування текстильних матеріалів. Розроблена модель повинна встановлювати взаємозв'язок між конструктивними параметрами установки, режимами її роботи, характеристиками текстильного матеріалу та ефективністю проникнення імпрегнату, забезпечуючи можливість прогнозування результатів обробки й оптимізації технологічного процесу.

Аналіз досліджень та публікацій

Тенденції вимог до якісних показників продукції та до техніко-економічних показників виробництва текстильних матеріалів та модифікованих тканин в сучасних умовах технологічного розвитку промисловості мають постійно зростаючий характер [1]. Слідуючи з цього, виникає потреба в розробці нових та удосконаленні існуючих технологічних процесів та виробничого устаткування, що мають місце у виготовленні таких матеріалів.

Авторами роботи [2] проаналізовано методи обробки та характерне їм сучасне устаткування, яке використовується при імпрегуванні матеріалів, для якого виокремлено основні переваги та недоліки при модифікації тканин методом просочування розчинами. У відповідності до результатів аналізу виокремлено перспективний метод обробки – кавітаційний метод імпрегнування.

Слідуючи з результатів аналізу [2] процесів обробки, основна технологічна складність імпрегнування поширених методів та технічного устаткування полягає в недостатній глибині та неефективній рівномірності просочування текстильних матеріалів, або високих енергоємних процесів просочування функціональними реагентами – вогнезахисними сполуками (антипіренами), гідрофобізаторами та барвниками. Класичні промислові методи [2] обробки, такі як просте занурення або розпилення, 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 імпрегнатів по товщині виробу. Навіть при використанні високоефективних 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.

Автори роботи [3] в межах дослідження ефективності кавітаційного ефекту для здійснення імпрегнування встановили, що даний метод має ряд технологічних переваг, що можуть покращити якість обробки текстильних матеріалів, а відповідно і продукції.

В результаті розширеного аналізу вітчизняних та закордонних наукових праць в сфері імпрегнування тканин встановлено, що на даний момент розвитку галузі, обладнання для просочування текстильних тканин яке використовує ефект кавітаційного бомбардування для насичення імпрегнатами відсутнє, тому постає завдання в науковій розробці дослідної установки для імпрегнування в основі якої лежатиме принцип використання явища кавітації.

Виклад основного матеріалу

Для математичного опису процесу імпрегнування текстильних матеріалів у безперервному технологічному циклі розроблено ультразвукову кавітаційну імпрегнувальну установку, на основі якої побудовано математичну модель процесу насичення текстильного матеріалу імпрегнатом. Авторами виконано

комплекс теоретичних, аналітичних та конструкторських робіт, спрямованих на створення ефективної автоматизованої системи обробки текстильних матеріалів. Основними етапами розробки стали:

- аналіз сучасних технологічних процесів імпрегнування текстильних матеріалів та визначення їх основних недоліків і особливостей;
- дослідження існуючого технологічного устаткування для просочування, фарбування та хімічної обробки текстильних матеріалів;
- формування основних технологічних та конструктивних вимог до розроблюваної установки;
- розробка кінематичної, гідравлічної та енергетичної схем установки;
- побудова математичної моделі роботи технологічної системи;
- проєктування конструкції установки та її функціональних вузлів;
- проведення фізичного моделювання процесів роботи установки та перевірка працездатності запропонованих технічних рішень.

У процесі дослідження сучасних виробничих ліній для фарбування, просочування та імпрегнування текстильних матеріалів [4] встановлено, що характерною особливістю таких систем є лінійна організація технологічного процесу. Подібні виробничі системи функціонують за принципом послідовного виконання дискретних технологічних операцій, об'єднаних у безперервний виробничий цикл. При цьому масштабування обсягів виробництва переважно реалізується шляхом дублювання окремих виробничих ліній або технологічних модулів.

На основі проведеного аналізу визначено типову структуру технологічного процесу імпрегнування текстильних матеріалів, яка включає такі основні етапи: подача сировини у вигляді рулонів, листових матеріалів або бобін на завантажувальну лінію → підготовка матеріалу до процесу імпрегнування → просочування або імпрегнування активними технологічними розчинами → видалення надлишків імпрегнату та сушіння матеріалу → формування, пакування та відвантаження готової продукції. Узагальнену модель технологічного процесу наведено на рисунку 1.

Проведений аналіз дозволив визначити ключові вимоги до розроблюваного устаткування, зокрема необхідність забезпечення безперервного транспортування матеріалу, стабільності швидкості його просування, рівномірності імпрегнування, ефективного видалення надлишків технологічного розчину, а також можливості автоматизованого керування технологічними параметрами процесу.

На основі отриманих результатів було розроблено ультразвукову кавітаційну імпрегнвальну установку, конструкція та принцип роботи якої наведені нижче.

Робота запропонованої установки передбачає безперервне переміщення текстильного матеріалу крізь систему напрямних і натягувальних роликів та осей, а також зону технологічної обробки. Конструктивна схема установки наведена на рисунку 1.

Подача матеріалу в установку здійснюється оператором шляхом встановлення рулону тканини на вал розмотувального вузла (1), після чого рулон фіксується на посадкових кронштейнах (2). Далі оператор за допомогою вузла протяжки та допоміжних елементів здійснює заправлення матеріалу в технологічний тракт установки. Матеріал послідовно проходить крізь систему натягувальних осей (3), розташованих у резервуарі (4), що забезпечують стабілізацію траєкторії руху полотна (5) та необхідний ступінь його занурення в робоче середовище.

У процесі руху матеріал проходить через резервуар (4) з активним технологічним розчином (6). До резервуару під'єднані ультразвукові випромінювачі типу Ланжевена (7). Під час роботи випромінювачів у рідкому середовищі генерується ультразвукове поле, що спричиняє виникнення кавітаційних процесів. Утворення та колапс кавітаційних бульбашок забезпечують інтенсифікацію проникнення активного розчину в структуру текстильного матеріалу, що реалізує процес кавітаційної імпрегації.

Після проходження зони обробки матеріал надходить до вузла віджиму (8), призначеного для видалення надлишків технологічного розчину з поверхні та структури полотна. Відокремлена рідина повертається назад у резервуар (4), що забезпечує циркуляцію та раціональне використання робочого середовища.

На завершальному етапі оброблений матеріал подається до вузла намотування (намотується на вал 9), де здійснюється формування нового рулону тканини. Просування матеріалу крізь установку відбувається безперервно та узгоджується з кінематичною схемою і технологічним режимом роботи кавітаційного імпрегатора.

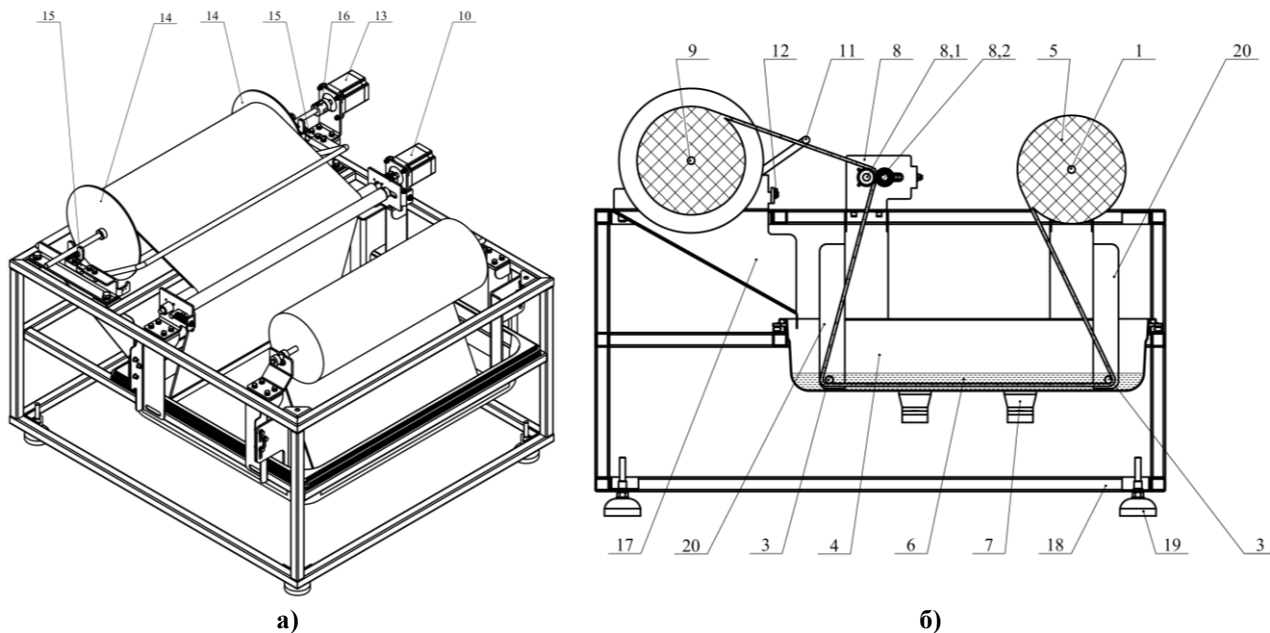
Привід установки реалізовано за принципом пулерного механізму, інтегрованого безпосередньо у вузол віджиму матеріалу. Конструкція вузла передбачає наявність ведучого (8,1) та веденого роликів (8,2), між якими проходить текстильне полотно (5). Така схема забезпечує одночасне транспортування матеріалу та видалення надлишків технологічного розчину після проходження зони кавітаційної обробки.

Приведення в дію ведучого ролика здійснюється за допомогою серводвигуна (10), який забезпечує плавне регулювання швидкості обертання та підтримання стабільної лінійної швидкості переміщення полотна. Використання серводвигуна дозволяє забезпечити точне узгодження швидкості транспортування матеріалу з технологічними параметрами процесу імпрегації, що є важливим фактором для досягнення рівномірної та якісної обробки текстильного матеріалу по всій його довжині.

Намотування обробленого матеріалу у рулон реалізується окремим електроприводом, встановленим безпосередньо на осі формування нового рулону. Робота даного приводу передбачає динамічне регулювання

швидкості обертання залежно від ступеня натягу матеріалу. Для цього у конструкції установки передбачено використання кінцевого датчика натягу (складається з натягувача матеріалу 11 та кінцевого вимикача 12), сигнали від якого використовуються системою керування для автоматичного коригування режиму роботи двигуна намотувального вузла (13).

Необхідність зміни швидкості обертання двигуна намотування обумовлена поступовим збільшенням діаметра рулону в процесі його формування. Автоматичне регулювання швидкості дозволяє підтримувати постійний натяг текстильного полотна незалежно від поточного діаметра рулону, що забезпечує рівномірність намотування та запобігає виникненню деформацій або нерівномірного ущільнення матеріалу.



а) загальний вигляд установки в ізометричній проекції; б) імпрегнвальна установка в розрізі
Рис. 1. Модель кавітаційної імпрегнвальної установки

Запропонована конструкція з використанням двох незалежних приводів – приводу транспортування матеріалу та приводу намотування – дозволяє ефективно вирішити проблему стабілізації швидкості проходження полотна через резервуар обробки (4). Завдяки цьому лінійна швидкість руху матеріалу в зоні кавітаційної імпрегації залишається сталою як на початковому етапі формування рулону, так і при збільшенні його діаметра, що забезпечує однорідність технологічної обробки та стабільну якість імпрегації по всій довжині матеріалу.

Керування установкою реалізовано на базі комп'ютеризованої системи автоматизації (на рисунку не наведено). Система забезпечує керування режимами роботи приводів, регулювання швидкості транспортування матеріалу, контроль натягу полотна, а також координацію роботи технологічних вузлів установки. Автоматизація процесу дозволяє підвищити стабільність технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактора та забезпечити ефективну експлуатацію кавітаційного імпрегатора відповідно до вимог сучасного автоматизованого виробництва.

Стабілізація вздовж осі валу, рулону, що намотується, відбувається за допомогою направляючих дисків (14).

У конструкції установки передбачено використання вузла контролю маси обробленого матеріалу (15), призначеного для визначення ваги сформованого рулону після завершення процесу імпрегації та намотування. Застосування даного вузла дозволяє здійснювати контроль кількості обробленого матеріалу, аналіз витрати технологічного розчину, а також забезпечувати облік готової продукції в автоматизованому режимі.

Конструктивно вузол зважування реалізовано на базі двох тензометричних балок (тензобалок), що встановлені з протилежних сторін опорних кронштейнів вузла намотування. На вказані кронштейни встановлюється вісь рулону (9), на яку здійснюється намотування обробленого текстильного матеріалу. Така схема забезпечує рівномірний розподіл навантаження між тензометричними елементами та підвищує точність вимірювання маси рулону.

Для забезпечення коректності та об'єктивності вимірювання у конструкції передбачено механічне розчеплення приводу вузла намотування з віссю рулону за рахунок використання кулачкової муфти (16). Двигун намотувального вузла після завершення процесу формування рулону від'єднується від осі, що виключає передачу паразитних механічних навантажень та реактивних моментів на систему тензометричного контролю. Це дозволяє усунути вплив приводу на результати вимірювання та забезпечити точне визначення фактичної маси сформованого рулону.

Процес зважування здійснюється після завершення намотування матеріалу та зупинки технологічного процесу. Сигнали з тензометричних датчиків передаються до системи керування установкою, де виконується

Окрім, вище приведених функціональних компонентів установка містить автоматичну систему подачі імпрегнату (6) в резервуар (4) та систему керування роботою установки які не показані в даній роботі.

залежністю: $t = L/v$, де: t – час перебування матеріалу у зоні кавітаційної обробки, с; L – довжина зони ультразвукової обробки, м; v – лінійна швидкість руху текстильного полотна, м/с.

Лінійна швидкість переміщення матеріалу визначається параметрами приводного ролика та описується виразом: $v = \omega r$, де: v – лінійна швидкість руху полотна, м/с; ω – кутова швидкість обертання ведучого ролика, рад/с; r – радіус ведучого ролика, м.

У процесі роботи ультразвукові випромінювачі створюють у технологічному середовищі акустичне поле високої інтенсивності, яке забезпечує виникнення кавітаційних процесів. Інтенсивність ультразвукового поля визначається співвідношенням [5]: $I = P/S$, де: I – інтенсивність ультразвукового випромінювання, Вт/м²; P – потужність ультразвукового випромінювача, Вт; S – площа робочої поверхні випромінювання, м².

Змінний акустичний тиск у рідкому середовищі може бути описаний гармонічною залежністю: $p = p_0 \sin(2\pi f t)$, де: p – миттєве значення акустичного тиску, Па; p_0 – амплітуда акустичного тиску, Па; f – частота ультразвукових коливань, Гц; t – час, с.

Інтенсивність кавітаційних процесів у робочому середовищі оцінюється за допомогою кавітаційного числа [6]: $\sigma = (p - p_v)/(0,5\rho v^2)$, де: σ – кавітаційне число; p – тиск у рідкому середовищі, Па; p_v – тиск насиченої пари рідини, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; v – швидкість потоку рідини, м/с.

Зменшення значення кавітаційного числа свідчить про підвищення інтенсивності кавітаційних явищ та збільшення ефективності проникнення технологічного розчину в структуру текстильного матеріалу.

Процес проникнення активного технологічного розчину в структуру текстильного матеріалу описується законом дифузії [7]: $J = -D \frac{dc}{dx}$, де: J – густина потоку речовини; D – коефіцієнт дифузії; c – концентрація технологічного розчину; x – координата проникнення речовини у матеріал.

Під дією ультразвукової кавітації ефективний коефіцієнт дифузії збільшується, що може бути представлено залежністю:

$$D_{eff} = D_0(1 + kI), \quad (2)$$

де: D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії;

D_0 – коефіцієнт дифузії без ультразвукового впливу;

k – емпіричний коефіцієнт впливу ультразвуку;

I – інтенсивність ультразвукового поля.

Отримана математична модель дозволяє встановити взаємозв'язок між конструктивними та технологічними параметрами ультразвукової кавітаційної установки і ефективністю процесу імпрегнування текстильних матеріалів. Використання запропонованої моделі створює основу для подальшої оптимізації режимів роботи установки, підвищення рівномірності просочування та зменшення витрат технологічного розчину.

Модель натягу текстильного полотна в процесі імпрегнування

Одним із ключових факторів, що визначає стабільність технологічного процесу кавітаційного імпрегнування, є забезпечення сталого натягу текстильного полотна під час його безперервного переміщення через зони технологічної обробки. Нестабільність натягу може призводити до нерівномірного просочування матеріалу, зміни геометричних параметрів полотна, а також до виникнення складок або локальних деформацій, що негативно впливають на якість кінцевого продукту.

У межах даної роботи текстильне полотно розглядається як пружне середовище, що підпорядковується закону Гука в межах допустимих деформацій. За таких умов сила натягу полотна може бути описана залежністю між механічними властивостями матеріалу та його деформаційним станом:

$$F_t = E\varepsilon A, \quad (3)$$

де: F_t – сила натягу текстильного полотна, Н;

E – модуль пружності матеріалу, Па;

ε – відносне видовження полотна;

A – ефективна площа поперечного перерізу текстильного матеріалу, м².

Відносне видовження полотна визначається як відношення зміни довжини матеріалу до його початкової довжини: $\varepsilon = \Delta L/L_0$, де: ΔL – приріст довжини полотна під дією натягу, м; L_0 – початкова довжина полотна, м.

Таким чином, сила натягу є лінійно залежною від механічних характеристик матеріалу та величини його деформації. У реальних умовах роботи установки натяг полотна не є сталою величиною, оскільки змінюється внаслідок переміщення матеріалу через систему роликів, вузол віджиму та намотувальний механізм.

Для забезпечення стабільності процесу імпрегнування в конструкції установки передбачено систему автоматичного регулювання натягу, яка базується на зворотному зв'язку від датчика натягу. Отриманий сигнал використовується системою керування для коригування швидкості обертання намотувального вузла, що дозволяє компенсувати зміну радіуса рулону та підтримувати сталий натяг полотна протягом усього технологічного циклу.

Окремо слід відзначити, що в процесі намотування відбувається поступове збільшення діаметра рулону, що призводить до зміни кінематичних умов системи. Це вимагає адаптивного регулювання швидкості обертання намотувального двигуна з метою забезпечення постійного натягу матеріалу. Таким чином, запропонована модель натягу є складовою частиною загальної математичної моделі установки та дозволяє описати взаємозв'язок між механічними властивостями текстильного матеріалу та режимами роботи привідної системи.

Математична модель процесу намотування рулону текстильного матеріалу

Процес намотування обробленого текстильного полотна є важливою складовою технологічного циклу ультразвукової кавітаційної імпрегнувальної установки, оскільки від його стабільності залежить рівномірність укладання матеріалу, збереження його структурної цілісності та точність дозування готової продукції. Особливістю даного процесу є безперервна зміна геометричних параметрів рулону, що призводить до необхідності адаптивного регулювання кінематичних характеристик намотувального вузла.

У процесі намотування радіус рулону збільшується внаслідок пошарового укладання текстильного матеріалу. З урахуванням товщини полотна та довжини намотаного матеріалу поточний радіус рулону може бути описаний залежністю: $R = R_0 + ht/2\pi$, де: R – поточний радіус рулону, м; R_0 – початковий радіус втулки, м; h – товщина текстильного матеріалу, м; t – довжина намотаного полотна, м.

Отримана залежність відображає лінійне зростання радіуса рулону зі збільшенням об'єму намотаного матеріалу. У реальних умовах процесу значення товщини h може вважатися сталою величиною для однорідного текстильного полотна, що дозволяє використовувати модель для інженерних розрахунків та систем автоматичного керування.

Кінематичний режим роботи намотувального вузла визначається необхідністю підтримання сталої лінійної швидкості руху матеріалу. З цією метою кутова швидкість обертання намотувального механізму повинна змінюватися відповідно до поточного радіуса рулону. Математично це описується співвідношенням: $\omega = v/R$, де: ω – кутова швидкість обертання намотувального вузла, рад/с; v – лінійна швидкість переміщення текстильного полотна, м/с; R – поточний радіус рулону, м.

Таким чином, зі збільшенням радіуса рулону кутова швидкість намотування повинна зменшуватися для забезпечення сталої лінійної швидкості подачі матеріалу. Це є основою адаптивного керування намотувальним приводом установки.

Використання даної математичної моделі дозволяє реалізувати автоматичне регулювання режиму намотування, забезпечити рівномірну щільність укладання текстильного полотна та запобігти виникненню надмірного натягу або провисання матеріалу в процесі формування рулону.

Енергетична модель ультразвукової кавітаційної імпрегнувальної установки

Одним із важливих етапів дослідження роботи ультразвукової кавітаційної імпрегнувальної установки є оцінка її енергетичних характеристик. Аналіз енергоспоживання дозволяє визначити ефективність використання енергії в процесі обробки текстильних матеріалів, оцінити частку енергії, що витрачається на окремі технологічні операції, а також сформулювати рекомендації щодо оптимізації режимів роботи установки.

У розробленій установці основними споживачами електричної енергії є ультразвукова система кавітаційної обробки, привід транспортування текстильного полотна та привід намотувального вузла. Враховуючи незалежність роботи зазначених функціональних вузлів, загальне енергоспоживання установки може бути представлене у вигляді суми потужностей окремих підсистем:

$$P_{tot} = P_{us} + P_d + P_w, \quad (4)$$

де: P_{tot} – загальна споживана потужність установки, Вт;

P_{us} – потужність ультразвукової системи, Вт;

P_d – потужність приводу транспортування матеріалу, Вт;

P_w – потужність приводу намотувального вузла, Вт.

*Окрім вище приведених складових, також, має місце система подачі та контролю рівня імпрегнату в резервуарі в даній моделі установки вона не розглядається.

Основною складовою загального енергоспоживання є ультразвукова система, оскільки саме вона забезпечує генерацію акустичних коливань високої інтенсивності та створення кавітаційного поля у робочому середовищі. Енергія ультразвукових коливань передається рідині через випромінювачі типу Ланжевена та використовується для формування кавітаційних бульбашок, їх подальшого колапсу та інтенсифікації процесів масопереносу між технологічним розчином і текстильним матеріалом.

Потужність приводу транспортування визначається механічною роботою, необхідною для переміщення текстильного полотна через резервуар обробки, систему напрямних роликів та вузол віджиму. Для спрощеного опису даний параметр може бути визначений залежністю: $P_d = F_t v$, де: F_t – сила натягу полотна, Н; v – швидкість переміщення матеріалу, м/с.

З наведеної залежності видно, що енергоспоживання транспортної системи безпосередньо залежить від натягу матеріалу та швидкості його руху через технологічну лінію.

Потужність приводу намотувального вузла визначається необхідністю створення крутного моменту для формування рулону та підтримання заданого натягу полотна. Механічна потужність намотувального приводу може бути описана співвідношенням: $P_w = M\omega$, де: M – крутний момент на валу намотувального приводу, Н·м; ω – кутова швидкість обертання рулону, рад/с.

У процесі роботи радіус рулону поступово збільшується, що супроводжується зменшенням кутової швидкості його обертання за умови підтримання сталої швидкості руху полотна. Завдяки використанню автоматизованої системи керування забезпечується адаптивна зміна режиму роботи намотувального приводу та стабілізація енергетичних параметрів процесу.

Для оцінки енергоефективності процесу імпрегнування доцільно використовувати показник питомих

витрат енергії на одиницю обробленого матеріалу:

$$E_s = \frac{P_{tot}}{Q}, \quad (5)$$

де: E_s – питомі витрати енергії, Вт·год/кг;

P_{tot} – загальна потужність установки, Вт;

Q – продуктивність установки, кг/год.

Запропонована енергетична модель дозволяє оцінювати вплив конструктивних та технологічних параметрів установки на рівень енергоспоживання, визначати найбільш енергоємні вузли системи та здійснювати оптимізацію режимів роботи ультразвукового кавітаційного імпрегатора з метою підвищення його енергоефективності та продуктивності.

В ході моделювання роботи машини показано основні принципи роботи установки та описано математичним шляхом роботу установки. Проте, для більш детального розуміння процесу обробки текстильного матеріалу шляхом кавітаційного бомбардування необхідно описати фізичний процес насичення тканини імпрегнатом.

Математична модель процесу ультразвукового кавітаційного імпрегунування

Для побудови моделі визначимо чинники які обмежують процес обробки та визначають характер взаємодії матеріалу, запропонованої установки та імпрегнату і при цьому описують фізичні процеси, що перебігають під час обробки. До цих параметрів віднесемо:

1. Параметри ультразвукового поля, що характеризують зону обробки.

1.1 Площа опромінення.

1.1.1 Довжина зони обробки.

1.1.2 Ширина зони обробки

1.2 Глибин опромінення.

1.3 Об'єм зони опромінення.

2. Параметри які визначають переміщення матеріалу в зоні обробки.

2.1 Відстань від джерела опромінення (визначає інтенсивність опромінення кавітацією матеріалу).

2.2 Швидкість просування матеріалу.

2.3 Коефіцієнт стабільності механічних характеристик переміщення матеріалу (визначає параметри натягу матеріалу, деформації під впливом зовнішніх сила та стабільність перебування матеріалу в однорідній зоні кавітаційної обробки).

3. Параметри які визначають вагові та габаритні характеристики і процес просочування матеріалу.

3.1 Об'єм оброблюваної ділянки матеріалу.

3.1.1 Довжина матеріалу.

3.1.2 Ширина матеріалу.

3.1.3 Висота (товщина) матеріалу.

3.2 Вага сухого матеріалу.

3.3 Щільність матеріалу.

3.4 Максимальна вага насиченого матеріалу (вага матеріалу + вага рідини, яка повністю заповнює пори матеріалу).

Для опису процесу кавітаційного імпрегунування текстильного матеріалу необхідно визначити геометричні параметри зони ультразвукового впливу, оскільки саме вони визначають тривалість взаємодії матеріалу з кавітаційним полем та об'єм робочого середовища, в межах якого відбувається інтенсивне проникнення імпрегнату в структуру тканини (див. рис. 3).

Площа зони кавітаційного впливу визначається добутком її довжини та ширини: $S_o = L_o B_o$, де: S_o – площа зони обробки, м²; L_o – довжина зони обробки, м; B_o – ширина зони обробки, м.

Величина площі зони обробки характеризує поверхню матеріалу, яка одночасно перебуває під дією ультразвукового кавітаційного поля.

Оскільки ультразвукове випромінювання поширюється у певному об'ємі рідкого середовища (див. рис. 3. Позначення 1, 5, 7, 8,1, 8,2, 9 та 11 відповідають позначенням наведеним на рисунку 1), важливим параметром є об'єм зони кавітаційного впливу, який визначається залежністю: $V_o = L_o B_o H_o$, де: V_o – об'єм зони обробки, м³; H_o – ефективна глибина дії ультразвукового поля, м.

Ефективна глибина дії ультразвукового поля визначається характеристиками ультразвукових випромінювачів, частотою коливань, потужністю випромінювання та фізичними властивостями робочого розчину. У межах даного об'єму формується кавітаційне середовище, яке забезпечує інтенсифікацію процесів масопереносу та проникнення імпрегнату в пористу структуру текстильного матеріалу.

Таким чином, геометричні параметри зони обробки є базовими характеристиками математичної моделі процесу імпрегунування та визначають просторові межі протікання фізичних процесів кавітаційного насичення матеріалу.

Для побудови математичної моделі процесу імпрегунування необхідно визначити геометричні характеристики текстильного матеріалу, які безпосередньо впливають на кількість імпрегнату, що може бути накопичена в його структурі. Розглянемо елементарну ділянку текстильного полотна довжиною dx .

Об'єм елементарної ділянки матеріалу визначається як: $dV_m = B_m h_m dx$, де: dV_m – об'єм елементарної ділянки матеріалу, м³; B_m – ширина матеріалу, м; h_m – товщина матеріалу, м; dx – елементарна довжина ділянки матеріалу, м.

Отримана залежність дозволяє визначити об'єм будь-якої нескінченно малої ділянки текстильного полотна, що перебуває у зоні кавітаційної обробки. Надалі ця величина використовується для опису процесу проникнення імпрегнату в пористу структуру матеріалу та визначення локальної концентрації технологічного розчину.

Для всієї оброблюваної ділянки матеріалу об'єм визначається залежністю: $V_m = L_m B_m h_m$, де: V_m – повний об'єм оброблюваної ділянки матеріалу, м³; L_m – довжина матеріалу, м; B_m – ширина матеріалу, м; h_m – товщина матеріалу, м.

Дана залежність характеризує загальний геометричний об'єм текстильного матеріалу, який бере участь у процесі імпрегнування. Величина V_m є одним із ключових параметрів математичної моделі, оскільки визначає потенційний об'єм порового простору, доступного для заповнення імпрегнатом під дією ультразвукового кавітаційного поля.

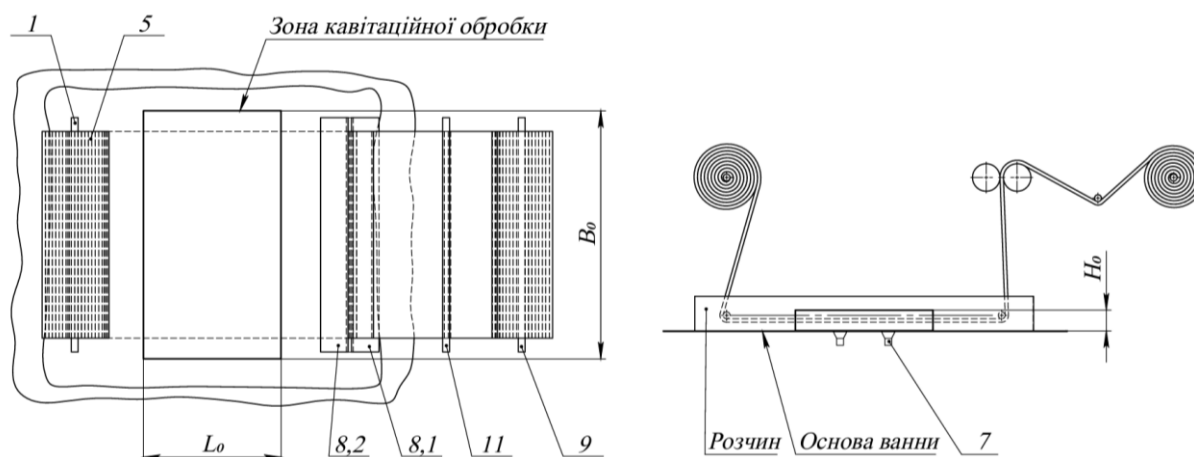


Рис. 3. Спрощене зображення зони кавітаційної обробки

Одним із визначальних параметрів процесу кавітаційного імпрегнування є тривалість перебування текстильного матеріалу в зоні дії ультразвукового поля. Саме час взаємодії матеріалу з кавітаційним середовищем визначає інтенсивність процесів масопереносу, ступінь проникнення імпрегнату в пористу структуру тканини та кінцеву ефективність обробки.

У розробленій установці матеріал переміщується через зону кавітаційного впливу з постійною лінійною швидкістю, тому час його перебування в зоні обробки визначається співвідношенням: $t_o = L_o/v$, де: t_o – час перебування матеріалу в зоні кавітаційної обробки, с; L_o – довжина зони обробки, м; v – лінійна швидкість переміщення матеріалу, м/с.

Отримана залежність показує, що тривалість обробки прямо пропорційна довжині зони кавітаційного впливу та обернено пропорційна швидкості руху текстильного полотна. Таким чином, збільшення довжини зони обробки або зменшення швидкості транспортування матеріалу призводить до зростання часу взаємодії тканини з кавітаційним середовищем.

Фізично це означає, що зі збільшенням часу перебування матеріалу в зоні ультразвукового впливу зростає кількість циклів утворення та колапсу кавітаційних бульбашок поблизу поверхні волокон. У результаті підвищується інтенсивність проникнення імпрегнату в структуру текстильного матеріалу та збільшується ступінь його насичення.

Таким чином, час перебування матеріалу в зоні кавітаційної обробки є одним із ключових технологічних параметрів, який безпосередньо впливає на ефективність процесу імпрегнування та використовується в подальших математичних залежностях моделі насичення матеріалу імпрегнатом.

Ефективність процесу кавітаційного імпрегнування значною мірою визначається інтенсивністю ультразвукового поля, яке формується випромінювачами в робочому середовищі. Під час поширення ультразвукових хвиль у рідині відбувається поступове розсіювання та поглинання акустичної енергії, внаслідок чого інтенсивність кавітаційного впливу зменшується зі збільшенням відстані від джерела випромінювання.

Для інженерного опису розподілу інтенсивності ультразвукового поля в робочому середовищі можна використати експоненціальну залежність:

$$I(z) = I_0 e^{-\beta z}, \quad (6)$$

де: $I(z)$ – інтенсивність ультразвукового поля на відстані (z) , Вт/м²;

I_0 – інтенсивність ультразвукового поля безпосередньо біля поверхні випромінювача, Вт/м²;

z – відстань від випромінювача до оброблюваного матеріалу, м;

β – коефіцієнт загасання ультразвукового поля в робочому середовищі, м⁻¹.

Отримана залежність показує, що зі збільшенням відстані між випромінювачем та текстильним матеріалом інтенсивність ультразвукового впливу зменшується за експоненціальним законом. Відповідно знижується інтенсивність утворення та колапсу кавітаційних бульбашок, що безпосередньо впливає на ефективність проникнення імпрегнату в структуру матеріалу.

Фізично коефіцієнт загасання β залежить від частоти ультразвукових коливань, властивостей технологічного розчину, температури середовища та наявності в ньому дисперсних включень. При збільшенні значення коефіцієнта загасання відбувається більш швидке зменшення інтенсивності ультразвукового поля в напрямку поширення хвилі.

Таким чином, відстань між випромінювачами та поверхнею текстильного матеріалу є важливим конструктивним параметром установки. Її оптимізація дозволяє забезпечити максимальну інтенсивність кавітаційного впливу в зоні обробки та підвищити ефективність процесу імпрегнування.

Процес проникнення імпрегнату в структуру текстильного матеріалу має нелінійний характер. На початковому етапі обробки, коли більшість порового простору є вільною, швидкість насичення матеріалу є максимальною. У міру заповнення пор імпрегнатом доступний об'єм для подальшого накопичення рідини зменшується, що призводить до поступового зниження швидкості просочування.

Основними факторами, які визначають швидкість насичення матеріалу, є інтенсивність кавітаційного впливу та поточний ступінь заповнення порового простору. Для математичного опису даного процесу приймемо, що швидкість накопичення імпрегнату пропорційна інтенсивності ультразвукового поля та частці ще не заповненого об'єму матеріалу. Тоді швидкість насичення може бути описана диференціальним рівнянням:

$$\frac{dm}{dt} = kI(z) \left(1 - \frac{m(t)}{m_{max}}\right), \quad (7)$$

де: $m(t)$ – поточна маса імпрегнату, що міститься в матеріалі в момент часу t , кг;

m_{max} – максимально можлива маса імпрегнату, яка може бути утримана матеріалом при повному заповненні порового простору, кг;

$I(z)$ – інтенсивність кавітаційного впливу на відстані z від випромінювача, Вт/м²;

k – коефіцієнт проникнення імпрегнату в структуру матеріалу, що враховує властивості текстильного полотна та технологічного розчину.

Величина $(1 - m(t)/m_{max})$ характеризує відносний об'єм порового простору, який залишається доступним для подальшого заповнення імпрегнатом. На початку процесу, коли $m(t) = 0$, дана величина дорівнює одиниці, а швидкість просочування є максимальною. У міру наближення поточної маси імпрегнату до граничного значення m_{max} швидкість насичення поступово зменшується та прямує до нуля.

Отримане рівняння описує локальну динаміку накопичення імпрегнату в матеріалі під час його перебування в зоні кавітаційної обробки та є вихідною залежністю для подальшого інтегрального опису процесу насичення текстильного матеріалу.

Для отримання аналітичної залежності, яка описує процес накопичення імпрегнату в структурі текстильного матеріалу, виконаємо інтегрування диференціального рівняння локальної швидкості насичення. Отримана залежність дозволить встановити взаємозв'язок між параметрами кавітаційної обробки та кінцевою кількістю імпрегнату, що накопичується в матеріалі.

Вихідне диференціальне рівняння процесу має вигляд: $\frac{dm}{dt} = kI(z) \left(1 - \frac{m}{m_{max}}\right)$.

Для подальшого інтегрування виконаємо розділення змінних:

$$\frac{dm}{1 - \frac{m}{m_{max}}} = kI(z)dt. \quad (8)$$

Інтегруючи ліву та праву частини рівняння від початкового стану до моменту завершення обробки, отримаємо:

$$\int_0^m \frac{dm}{1 - \frac{m}{m_{max}}} = \int_0^{t_0} kI(z)dt. \quad (9)$$

де: t_0 – час перебування матеріалу в зоні кавітаційної обробки, с.

Після виконання інтегрування отримуємо:

$$-m_{max} \ln \left(1 - \frac{m}{m_{max}}\right) = kI(z)t_0. \quad (10)$$

Дана залежність описує процес поступового накопичення імпрегнату в структурі текстильного матеріалу під дією ультразвукового кавітаційного поля.

Розв'язавши рівняння відносно маси накопиченого імпрегнату, одержимо основне рівняння процесу насичення:

$$m = m_{max} \left(1 - e^{-\frac{kI(z)t_0}{m_{max}}}\right). \quad (11)$$

Отриманий вираз показує, що маса імпрегнату в матеріалі зростає за експоненціальним законом та асимптотично наближається до максимально можливої величини m_{max} . Це відповідає фізичній природі процесу, оскільки зі зменшенням вільного порового простору швидкість подальшого проникнення рідини поступово

знижується.

З урахуванням того, що час перебування матеріалу в зоні обробки визначається швидкістю його переміщення через установку $t_o = L_o/v$, основне рівняння процесу насичення може бути представлено у вигляді:

$$m = m_{max} \left(1 - e^{-\frac{kI(z)L_o}{m_{max}v}} \right), \quad (12)$$

де: L_o – довжина зони кавітаційної обробки, м;

v – швидкість переміщення текстильного матеріалу, м/с.

Отримана інтегральна модель встановлює взаємозв'язок між конструктивними параметрами установки, режимами її роботи та кінцевою кількістю імпрегнату, що накопичується в структурі текстильного матеріалу. З аналізу залежності випливає, що збільшення інтенсивності ультразвукового поля або довжини зони обробки сприяє підвищенню ступеня насичення матеріалу, тоді як збільшення швидкості його переміщення через установку призводить до зменшення часу взаємодії з кавітаційним середовищем і, відповідно, зниження ефективності просочування.

Під час роботи установки ефективність кавітаційного імпрегнування залежить не лише від параметрів ультразвукового поля, а й від стабільності переміщення текстильного матеріалу через зону обробки. У реальних умовах експлуатації можуть виникати коливання натягу полотна, його локальні деформації та зміни положення відносно ультразвукових випромінювачів. Такі явища призводять до нерівномірності кавітаційного впливу та зниження ефективності просочування.

Для врахування зазначених факторів введемо коефіцієнт стабільності переміщення матеріалу K_s , який характеризує якість транспортування текстильного полотна через зону обробки.

Коефіцієнт K_s враховує:

- коливання натягу матеріалу;
- деформацію полотна під дією зовнішніх сил;
- відхилення матеріалу від оптимального положення в зоні кавітаційного впливу;
- нерівномірність перебування матеріалу в області максимальної інтенсивності ультразвукового поля.

З урахуванням даного коефіцієнта ефективна інтенсивність кавітаційного впливу визначається залежністю:

$$I_{ef} = K_s I(z), \quad (13)$$

де: I_{ef} – ефективна інтенсивність кавітаційного впливу, Вт/м²;

$I(z)$ – інтенсивність ультразвукового поля на відстані z від випромінювача, Вт/м²;

K_s – коефіцієнт стабільності транспортування матеріалу.

Значення коефіцієнта стабільності знаходиться в межах: $0 < K_s \leq 1$.

При $K_s = 1$ матеріал переміщується ідеально стабільно та постійно перебуває в зоні максимально ефективного кавітаційного впливу. Зменшення значення коефіцієнта свідчить про погіршення умов транспортування та відповідне зниження ефективності ультразвукової обробки.

Підставляючи ефективну інтенсивність у рівняння інтегральної моделі процесу просочування, отримаємо:

$$m = m_{max} \left(1 - e^{-\frac{kK_s I(z)L_o}{m_{max}v}} \right), \quad (14)$$

де: m – маса імпрегнату, накопичена в матеріалі після проходження зони обробки, кг;

m_{max} – максимально можлива маса імпрегнату при повному насиченні матеріалу, кг;

k – коефіцієнт проникнення імпрегнату в структуру матеріалу;

L_o – довжина зони кавітаційної обробки, м;

v – швидкість переміщення текстильного матеріалу, м/с.

Отримана залежність показує, що стабільність транспортування матеріалу безпосередньо впливає на кінцевий ступінь насичення текстильного полотна. Погіршення стабільності переміщення призводить до зменшення ефективної інтенсивності кавітаційного впливу та, відповідно, до зниження кількості імпрегнату, що проникає в структуру матеріалу під час обробки.

Для оцінювання ефективності процесу кавітаційного імпрегнування доцільно використовувати безрозмірний показник ступеня насичення матеріалу. Даний параметр характеризує частку порового простору текстильного матеріалу, яка була заповнена імпрегнатом у процесі обробки, та дозволяє порівнювати результати для різних типів матеріалів і режимів роботи установки.

Коефіцієнт насичення визначається як відношення поточної маси імпрегнату, що міститься в матеріалі після обробки, до максимально можливої маси імпрегнату при повному заповненні порового простору: $\eta = m/m_{max}$, де: η – коефіцієнт насичення матеріалу; m – поточна маса імпрегнату в матеріалі після обробки, кг; m_{max} – максимально можлива маса імпрегнату при повному насиченні матеріалу, кг.

Підставляючи отриману раніше залежність для маси накопиченого імпрегнату, отримаємо рівняння ступеня насичення матеріалу:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{kK_s I(z)L_o}{m_{max}v}}, \quad (15)$$

де: k – коефіцієнт проникнення імпрегнату в структуру текстильного матеріалу;
 K_s – коефіцієнт стабільності транспортування матеріалу;
 $I(z)$ – інтенсивність ультразвукового поля на відстані z від випромінювача, Вт/м²;
 L_o – довжина зони кавітаційної обробки, м;
 v – швидкість переміщення матеріалу, м/с.

Отримана залежність дозволяє безпосередньо оцінювати ефективність процесу імпрегнування та визначати вплив окремих конструктивних і технологічних параметрів на кінцевий результат обробки. Аналіз рівняння показує, що ступінь насичення збільшується зі зростанням інтенсивності кавітаційного впливу, довжини зони обробки та стабільності транспортування матеріалу. Водночас збільшення швидкості переміщення полотна через установку призводить до скорочення часу взаємодії з кавітаційним середовищем та зменшення коефіцієнта насичення.

Таким чином, коефіцієнт насичення є узагальненим показником ефективності процесу кавітаційного імпрегнування та може використовуватися як цільова функція при оптимізації режимів роботи установки і виборі раціональних параметрів технологічного процесу.

Отримана інтегральна модель дозволяє встановити взаємозв'язок між конструктивними параметрами установки, режимами її роботи та ефективністю процесу кавітаційного імпрегнування текстильних матеріалів. На відміну від класичних дифузійних моделей, запропонований підхід враховує специфіку безперервної ультразвукової обробки та дозволяє оцінити кінцевий результат процесу через масу імпрегнату, накопичену в структурі матеріалу.

Аналіз отриманих залежностей показує, що ступінь насичення текстильного матеріалу імпрегнатом збільшується зі зростанням інтенсивності кавітаційного поля, оскільки більш потужний ультразвуковий вплив забезпечує інтенсивніше утворення та колапс кавітаційних бульбашок, що сприяє активізації процесів масопереносу. Також підвищення ефективності просочування спостерігається при збільшенні довжини зони обробки, оскільки це призводить до зростання часу взаємодії матеріалу з кавітаційним середовищем.

Водночас збільшення швидкості переміщення текстильного полотна через установку зменшує тривалість перебування матеріалу в зоні ультразвукового впливу, що призводить до зниження ступеня насичення. Аналогічний ефект спостерігається при збільшенні відстані між текстильним матеріалом та ультразвуковими випромінювачами, оскільки інтенсивність кавітаційного поля поступово зменшується внаслідок загасання акустичних хвиль у робочому середовищі.

Суттєвий вплив на результат процесу має стабільність транспортування матеріалу. Погіршення умов переміщення полотна, виникнення коливань натягу або відхилення від оптимального положення в зоні обробки призводять до зменшення ефективної інтенсивності кавітаційного впливу та, відповідно, зниження кількості імпрегнату, що проникає в структуру матеріалу.

Особливістю отриманої моделі є те, що процес насичення має асимптотичний характер. У міру заповнення порового простору швидкість проникнення імпрегнату поступово зменшується, а маса накопиченої рідини наближається до свого граничного значення m_{max} , яке визначається структурними характеристиками текстильного матеріалу. Така поведінка повністю відповідає фізичній природі процесу імпрегнування та підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі.

Таким чином, розроблена інтегральна модель може бути використана для прогнозування ефективності процесу кавітаційного імпрегнування, оптимізації конструктивних параметрів установки та обґрунтування раціональних режимів її роботи. Отримані залежності створюють теоретичну основу для подальших експериментальних досліджень та практичного впровадження технології ультразвукового кавітаційного просочування текстильних матеріалів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У результаті проведеного дослідження виконано аналіз сучасних технологій імпрегнування текстильних матеріалів та встановлено основні фактори, що обмежують ефективність традиційних процесів просочування. На основі проведеного аналізу розроблено конструкцію автоматизованої ультразвукової кавітаційної установки безперервної дії, яка забезпечує стабільне транспортування текстильного матеріалу через зону обробки, автоматичне підтримання швидкості його переміщення та натягу, циркуляцію технологічного розчину, видалення надлишків імпрегнату й автоматизоване намотування готової продукції.

Основним науковим результатом роботи є розроблення інтегральної математичної моделі процесу ультразвукового кавітаційного імпрегнування текстильних матеріалів, яка описує закономірності накопичення імпрегнату в структурі матеріалу під дією ультразвукового кавітаційного поля. Запропонована модель встановлює взаємозв'язок між інтенсивністю ультразвукового впливу, довжиною зони кавітаційної обробки, швидкістю переміщення текстильного полотна, коефіцієнтом проникнення імпрегнату та стабільністю транспортування матеріалу, що дозволяє прогнозувати кінцевий ступінь насичення текстильного матеріалу залежно від конструктивних і технологічних параметрів установки.

Отримані аналітичні залежності можуть бути використані для оптимізації конструктивних параметрів ультразвукових кавітаційних імпрегнувальних установок, вибору раціональних режимів роботи та підвищення ефективності процесу імпрегнування текстильних матеріалів. Запропонована математична модель створює

теоретичну основу для автоматизованого керування процесом просочування та подальшого розвитку високоефективних технологій ультразвукової обробки текстильних матеріалів.

Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні експериментальної верифікації розробленої математичної моделі, визначенні значень її емпіричних коефіцієнтів для різних типів текстильних матеріалів та імпрегнувальних композицій, а також у розробленні алгоритмів адаптивного керування технологічним процесом на основі результатів математичного моделювання. Окремим напрямом подальших досліджень є оптимізація конструкції ультразвукової кавітаційної системи та дослідження впливу параметрів ультразвукового поля на рівномірність просочування і фізико-механічні властивості текстильних матеріалів.

Література

1. Harsanto B., Primiana I., Sarasi V., Satyakti Y. Sustainability Innovation in the Textile Industry: A Systematic Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 2. Art. 1549. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021549>.
2. Синюк О. М., Єрій А. В. Дослідження сучасних методів та технологічного устаткування для імпрегнування текстильних матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. № 5.1.
3. Yerii A., Syniuk O. Experimental study of the cavitation impregnation process of textile materials. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2026. Vol. 122, No. 2.
4. OECD. *Textile Finishing*. Series on Emission Scenario Documents. No. 7. Paris : OECD Publishing, 2014. 77 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264221185-en>.
5. Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. *Fundamentals of Acoustics*. 4th ed. New York : Wiley, 2000. 560 p.
6. Brennen C. E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York : Oxford University Press, 1995. 282 p.
7. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford : Clarendon Press, 1975. 414 p.

References

1. Harsanto B., Primiana I., Sarasi V., Satyakti Y. Sustainability Innovation in the Textile Industry: A Systematic Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 2. Art. 1549. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021549>.
2. Syniuk O. M., Yerii A. V. Doslidzhennia suchasnykh metodiv ta tekhnolohichnoho ustatkuvannia dlia imprehnuvannia tekstylnykh materialiv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2025. № 5.1.
3. Yerii A., Syniuk O. Experimental study of the cavitation impregnation process of textile materials. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2026. Vol. 122, No. 2.
4. OECD. *Textile Finishing*. Series on Emission Scenario Documents. No. 7. Paris : OECD Publishing, 2014. 77 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264221185-en>.
5. Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. *Fundamentals of Acoustics*. 4th ed. New York : Wiley, 2000. 560 p.
6. Brennen C. E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York : Oxford University Press, 1995. 282 p.
7. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford : Clarendon Press, 1975. 414 p.