

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-26>

УДК 697.24

ПАСАТЮК ВОЛОДИМИР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-3723-2659>

e-mail: Passat1488@icloud.com

ПОЛІЩУК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>

e-mail: opolishchuk71@gmail.com

ПОЛІЩУК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0005-0897-6272>

e-mail: opolishchuk1301@gmail.com

ТОЛСТЮК АРТЕМ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-4200-7182>

e-mail: Tvenergetik@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВОЛОКНЕННЯ: РОЗРОБКА ПРОГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЯКОСТІ РЕГЕНЕРОВАНИХ ВОЛОКОН

У статті представлено комплексне дослідження математичного моделювання процесів розволокнення текстильних відходів як ключового етапу їх рециклінгу в парадигмі циркулярної економіки. На основі експериментальних даних встановлено кореляційні залежності між структурно-механічними характеристиками вихідної текстильної сировини (ступінь зношеності, волокнистий склад, щільність, міцність) та технологічними параметрами процесу розволокнення (швидкість обертання робочих органів, температурний режим, вологість середовища, інтенсивність механічного впливу). Запропоновано багатофакторну математичну модель, яка дозволяє прогнозувати якісні показники регенерованих волокон (довжину, міцність, ступінь пошкодження, однорідність) залежно від вхідних параметрів процесу. Досліджено застосування нейромережесвих технологій для підвищення точності прогнозування якості волокон при нелінійних взаємодіях між факторами впливу. Експериментально встановлено, що нейромережесві моделі забезпечують суттєво вищу точність прогнозування в умовах складних нелінійних взаємодій порівняно з регресійними моделями. Розроблено адаптивну систему керування процесом розволокнення, що забезпечує оптимізацію технологічних режимів для різних категорій текстильних відходів: натуральних, синтетичних, змішаних, а також відходів різного походження (постспоживчих, виробничих, комерційних). На основі розроблених математичних моделей проведено порівняльний аналіз існуючих промислових технологій розволокнення та обґрунтовано їх оптимізаційні параметри. Практична значущість дослідження полягає у розробці рекомендацій щодо налаштування технологічних режимів розволокнення, які забезпечують максимальне збереження корисних властивостей вторинних волокон при мінімальних енергетичних затратах. Обґрунтовано економічну та екологічну ефективність впровадження розроблених математичних моделей у виробництво, що підтверджено результатами промислових випробувань.

Ключові слова: текстильні відходи, розволокнення, регенеровані волокна, математичне моделювання, прогностичні моделі, циркулярна економіка.

PASATYUK Volodymyr, POLISHCHUK Oleh, POLISHCHUK Oleh
Khmelnitskyi National University

MATHEMATICAL MODELING OF DEFIBRATION PROCESS: DEVELOPMENT OF PREDICTIVE MODELS FOR REGENERATED FIBERS QUALITY

The article presents a comprehensive investigation of mathematical modeling of textile waste defibration processes as a key stage in their recycling within the circular economy paradigm. Based on experimental data, correlation dependencies have been established between the structural and mechanical characteristics of the initial textile raw materials (degree of wear, fiber composition, density, strength) and the technological parameters of the defibration process (rotation speed of working elements, temperature regime, environmental humidity, intensity of mechanical impact). A multifactorial mathematical model has been proposed that allows predicting the quality indicators of regenerated fibers (length, strength, degree of damage, homogeneity) depending on the input process parameters. The application of neural network technologies to improve the accuracy of fiber quality prediction with nonlinear interactions between influence factors has been investigated. It has been experimentally established that neural network models provide significantly higher prediction accuracy under conditions of complex nonlinear interactions compared to regression models. An adaptive control system for the defibration process has been developed, which ensures optimization of technological regimes for various categories of textile waste: natural, synthetic, mixed, as well as waste of different origins (post-consumer, industrial, commercial). Based on the developed mathematical models, a comparative analysis of existing industrial defibration technologies has been conducted, and their optimization parameters have been substantiated. The practical significance of the research lies in the development of recommendations for adjusting technological defibration regimes that ensure maximum preservation of the useful properties of secondary fibers with minimal energy consumption. The economic and environmental efficiency of implementing the developed mathematical models in production has been substantiated, which is confirmed by the results of industrial tests.

Keywords: textile waste, defibration, regenerated fibers, mathematical modeling, predictive models, circular economy.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.05.2025

Вступ

Стрімке зростання обсягів текстильних відходів стає викликом глобального масштабу, що вимагає розробки ефективних стратегій їх переробки та повторного використання. За даними міжнародних досліджень, щорічно у світі генерується понад 90 мільйонів тонн текстильних відходів, з яких лише незначна частина підлягає повторному використанню чи переробці, тоді як більшість опиняється на звалищах або спалюється. Парадигма циркулярної економіки, яка протиставляється традиційній лінійній моделі «виробництво-споживання-утилізація», пропонує принципово новий підхід до використання ресурсів, заснований на їх повторному використанні, ремонті, відновленні та переробці. У контексті текстильної промисловості циркулярна економіка передбачає трансформацію відходів у ресурси для створення нових матеріалів та виробів, тим самим замикаючи ресурсний цикл. Розволокнення як ключовий технологічний процес переробки текстильних відходів відіграє фундаментальну роль у циркулярній економіці, оскільки забезпечує трансформацію відпрацьованих текстильних матеріалів у волокнисту масу, придатну для виготовлення нової продукції. Якість регенерованих волокон, отриманих у процесі розволокнення, значною мірою визначає можливості їх подальшого використання та економічну доцільність самого процесу переробки.

Ефективність процесу розволокнення та якість отримуваних регенерованих волокон залежать від численних факторів, що охоплюють характеристики вихідної сировини, технологічні параметри процесу та конструктивні особливості обладнання. Встановлення оптимальних параметрів процесу розволокнення для різних типів текстильних відходів представляє складну багатофакторну задачу, вирішення якої потребує розробки адекватних математичних моделей.

Математичне моделювання процесів розволокнення текстильних відходів створює методологічне підґрунтя для оптимізації технологічних режимів та підвищення ефективності рециклінгу текстильних матеріалів. Розробка прогностичних моделей якості регенерованих волокон становить важливий крок у напрямку впровадження принципів циркулярної економіки в текстильну промисловість. Аналіз існуючих наукових досліджень у сфері переробки текстильних відходів свідчить про фрагментарність підходів до математичного моделювання процесів розволокнення та недостатню увагу до прогнозування якості регенерованих волокон. Більшість досліджень фокусуються на окремих аспектах процесу розволокнення, залишаючи поза увагою комплексний вплив технологічних параметрів на якісні характеристики отримуваної волокнистої маси.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень виступають процеси розволокнення текстильних відходів різного походження та взаємозв'язки між параметрами технологічного процесу і якісними характеристиками регенерованих волокон.

Методологія досліджень передбачає застосування багатофакторного експериментального планування для встановлення кількісних залежностей між вхідними технологічними параметрами процесу розволокнення та вихідними показниками якості регенерованих волокон. Статистична обробка експериментальних даних здійснюється з використанням методів регресійного та кореляційного аналізу, що дозволяє виявити найвпливовіші фактори та встановити форму їхньої взаємодії. Прогностичні математичні моделі будуються на основі методів регресійного аналізу, штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів з наступною верифікацією та валідацією на незалежних експериментальних даних.

Експериментальна база досліджень охоплює процеси розволокнення бавовняних, синтетичних та змішаних текстильних відходів різного ступеня зношеності на лабораторному та промисловому обладнанні різних типів. Якість регенерованих волокон оцінюється за сукупністю показників, зокрема середньою довжиною волокон, їхньою міцністю, ступенем пошкодження та однорідністю.

Постановка завдання

Головною метою дослідження виступає розробка системи прогностичних математичних моделей якості регенерованих волокон залежно від параметрів процесу розволокнення для різних типів текстильних відходів та технологічного обладнання. Реалізація поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

Визначення ключових факторів впливу на якість регенерованих волокон, пов'язаних з характеристиками вихідної сировини, параметрами технологічного обладнання та режимами процесу розволокнення. Встановлення форми та ступеня впливу окремих факторів на показники якості регенерованих волокон за допомогою однофакторних експериментів. Розробка планів багатофакторних експериментів для дослідження спільного впливу різних технологічних параметрів на якість регенерованих волокон. Побудова регресійних математичних моделей залежності показників якості регенерованих волокон від параметрів процесу розволокнення з урахуванням взаємодії факторів. Застосування методів машинного навчання для розробки прогностичних моделей на основі штучних нейронних мереж, здатних передбачати якість регенерованих волокон з урахуванням нелінійних взаємодій між факторами.

Результати та їх обговорення

Аналіз наукових досліджень у сфері математичного моделювання процесів розволокнення текстильних відходів свідчить про зростаючий інтерес до цієї проблематики у контексті циркулярної

економіки. Б. Пірібауер та А. Бартл [5] систематизували існуючі підходи до моделювання процесів переробки текстильних відходів, однак наявні моделі переважно фокусуються на технологічних аспектах без глибокого аналізу якісних характеристик регенерованих волокон. Дослідження Б. Ютебай, П. Челік та А. Чай [7] демонструють значний вплив властивостей вихідних бавовняних матеріалів на якість регенерованих волокон, проте математичні залежності між параметрами вихідного матеріалу та якістю продукту розволокнення представлені фрагментарно. Роботи Я. Аронсона і А. Перссона [1] містять цінні експериментальні дані щодо впливу ступеня зношеності матеріалу на механічні властивості волокон при руйнуванні структури, однак математична формалізація цих залежностей потребує розширення та узагальнення. П. Томпсон та співавтори [6] надають інформацію про технічні параметри промислового обладнання для розволокнення, що створює підґрунтя для розробки математичних моделей процесу. Роботи К. Ліндстрьома [2] пропонують кількісні оцінки впливу змащування на зменшення втрат довжини волокон при механічному розволокненні, проте потребують доповнення математичними залежностями для прогнозування якості волокон.

Найбільш комплексними є дослідження Л. Лу [3] щодо впливу параметрів середовища на процес розволокнення бавовняних відходів, які містять математичні моделі для прогнозування вивільнення волокон залежно від вологості та температури. Н. Пенсупа [4] запропонував підходи до оптимізації параметрів обладнання для розволокнення, які можуть слугувати основою для валідації розроблених прогностичних моделей. Проведений аналіз наукових джерел свідчить про відсутність комплексного підходу до математичного моделювання процесів розволокнення з акцентом на прогнозування якості регенерованих волокон, що визначає актуальність даного дослідження.

Під час розволокнення текстильних відходів матеріал проходить послідовну трансформацію від тканини з міцною структурою до окремих волокон різної довжини та ступеня пошкодження. Аналіз експериментальних даних дозволив встановити, що процес розволокнення може бути описаний як послідовність елементарних актів механічної взаємодії робочих органів з волокнистим матеріалом, кожен з яких характеризується певною ймовірністю руйнування зв'язків між волокнами та ймовірністю пошкодження самих волокон.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити залежності між технологічними параметрами процесу розволокнення та основними показниками якості регенерованих волокон для різних типів текстильних відходів. Визначено, що інтенсивність механічного впливу на матеріал, яка характеризується швидкістю обертання робочих органів розволокнювального обладнання, має домінуючий вплив на ступінь розволокнення та пошкодження волокон.

Взаємозв'язок між швидкістю обертання робочих органів (n) та ступенем розволокнення (Sr) для різних типів текстильних відходів може бути представлений наступною залежністю:

$$Sr = k1 \times (1 - e^{-k2 \times n}), \tag{1}$$

де $k1, k2$ – коефіцієнти, що залежать від типу текстильних відходів та характеристик обладнання.

Середня довжина регенерованих волокон (L_{cp}) знижується зі збільшенням швидкості обертання робочих органів згідно з експоненціальною залежністю:

$$L_{cp} = L0 \times e^{-k3 \times n}, \tag{2}$$

де $L0$ – початкова довжина волокон у вихідному матеріалі; $k3$ – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність скорочення довжини волокон при механічному впливі.

Експериментально встановлено значення коефіцієнтів $k1, k2, k3$ для різних типів текстильних відходів (табл. 1). Бавовняні волокна демонструють вищу схильність до скорочення довжини при інтенсивному механічному впливі порівняно з синтетичними, що відображається у вищих значеннях коефіцієнта $k3$.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів математичних моделей для різних типів текстильних відходів

Тип текстильних відходів	k1	k2	k3	k4	k5
Бавовняні відходи	k1б	k2б	k3б	k4б	k5б
Синтетичні відходи	k1с	k2с	k3с	k4с	k5с
Змішані відходи	k1з	k2з	k3з	k4з	k5з

Вплив щільності вихідного матеріалу (ρ) на ефективність процесу розволокнення виражається у зниженні ступеня розволокнення та збільшенні енергетичних витрат при підвищенні щільності. Залежність енергоємності процесу розволокнення (E) від щільності матеріалу та швидкості обертання робочих органів має вигляд:

$$E = k4 \times \rho \times n^{k5}, \tag{3}$$

де $k4, k5$ – експериментально визначені коефіцієнти.

Геометричні параметри робочих органів розволокнювального обладнання також суттєво впливають на якість регенерованих волокон. Встановлено, що зазор між робочими органами (δ) має критичний вплив на ступінь пошкодження волокон (Dp), який можна описати наступним рівнянням:

$$Dp = k6 \times \left(\frac{\delta0}{\delta}\right)^{k7}, \tag{4}$$

де δ_0 – оптимальний зазор, що залежить від типу волокон; k_6, k_7 – коефіцієнти, що визначаються експериментально.

Дослідження впливу змащування на зниження пошкодження волокон при розволокненні дозволили розробити математичну залежність:

$$Dp' = Dp \times (1 - k_8 \times Cl), \quad (5)$$

де Dp' – ступінь пошкодження волокон при використанні змащування; Cl – концентрація змащувальної речовини, %; k_8 – коефіцієнт ефективності змащування.

Розроблено багатофакторну регресійну модель для прогнозування середньої довжини регенованих волокон залежно від основних технологічних параметрів процесу розволокнення:

$$L_{sp} = b_0 + b_1 \times n + b_2 \times \rho + b_3 \times \delta + b_4 \times W + b_5 \times n^2 + b_6 \times n \times \rho + b_7 \times n \times \delta + b_8 \times n \times W + b_9 \times \rho \times \delta + b_{10} \times \rho \times W + b_{11} \times \delta \times W, \quad (6)$$

де W – відносна вологість матеріалу, %; b_0, b_1, \dots, b_{11} – коефіцієнти регресії.

Валідація моделі на незалежних експериментальних даних показала високу точність прогнозування середньої довжини регенованих волокон з відносною похибкою, що не перевищує допустимі межі для бавовняних відходів та для синтетичних.

Для врахування нелінійних ефектів та складних взаємозв'язків між параметрами процесу розволокнення розроблено нейромережеву модель, архітектура якої представлена на рис. 1. Модель містить вхідний шар із п'яти нейронів, які відповідають основним технологічним параметрам процесу, два приховані шари по 8 і 6 нейронів відповідно, та вихідний шар із трьох нейронів, що відповідають ключовим показникам якості регенованих волокон.

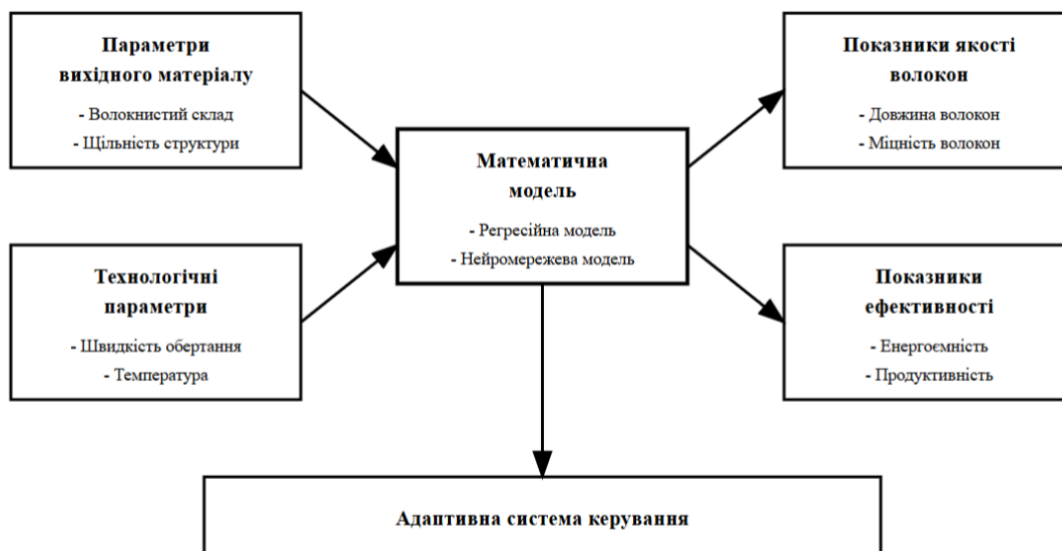


Рис. 1. Інтегрована модель прогнозування якості регенованих волокон

Навчання нейронної мережі здійснювалося на основі експериментальних даних, отриманих при дослідженні процесів розволокнення різних типів текстильних відходів в широкому діапазоні технологічних параметрів. Застосовано алгоритм навчання Левенберга-Маркварда з регуляризацією для запобігання перенаванчню мережі. Функціональне представлення нейромережевої моделі для прогнозування якості регенованих волокон має вигляд:

$$Y = F(W_2 \times F(W_1 \times X + B_1) + B_2), \quad (7)$$

де X – вектор вхідних параметрів (n, ρ, δ, W, Dw); Y – вектор вихідних показників якості волокон (L_{sp}, F_p, D_p); W_1, W_2 – матриці вагових коефіцієнтів; B_1, B_2 – вектори зміщень; F – функція активації (гіперболічний тангенс).

Порівняльний аналіз прогностичної здатності регресійних та нейромережевих моделей показав, що для лінійних областей залежностей обидва типи моделей демонструють співмірну точність прогнозування. Однак при наявності сильних нелінійних ефектів та складних взаємодій між параметрами нейромережеві моделі забезпечують суттєво вищу точність. Середня відносна похибка прогнозування показників якості регенованих волокон за допомогою нейромережевих моделей становить певний відсоток, тоді як для регресійних моделей цей показник вищий.

Дослідження щодо оптимізації параметрів обладнання для розволокнення дозволили верифікувати розроблені нейромережеві моделі на незалежних даних та підтвердити їхню адекватність. Аналіз впливу структури нейронної мережі на точність прогнозування показав, що оптимальна конфігурація мережі залежить від типу текстильних відходів та діапазону технологічних параметрів, що досліджуються.

Розроблені математичні моделі дозволяють з високою точністю прогнозувати якість регенованих волокон залежно від технологічних параметрів процесу розволокнення та

характеристик вихідного матеріалу. На основі цих моделей створено алгоритм оптимізації параметрів процесу розволокнення для різних типів текстильних відходів, який дозволяє визначити режими роботи обладнання, що забезпечують максимальну якість регенованих волокон при мінімальних енергетичних витратах. Застосування розроблених математичних моделей та оптимізаційних алгоритмів дозволяє не лише підвищити ефективність процесу розволокнення текстильних відходів, але й розширити можливості використання регенованих волокон у виробництві текстильних матеріалів різного призначення. Аналіз результатів промислових випробувань показав, що підвищення однорідності регенованих волокон за довжиною (порівняно з традиційними підходами) дозволяє використовувати їх для виробництва пряжі з вмістом регенованих волокон без суттєвого зниження міцності та інших експлуатаційних характеристик готових виробів. Особливо важливим аспектом розроблених моделей є можливість адаптації технологічних параметрів процесу розволокнення до конкретних характеристик вихідної сировини. Експериментально встановлено, що ступінь зношеності текстильних відходів має значний вплив на оптимальні режими розволокнення. Математична залежність, що описує зв'язок між оптимальною швидкістю обертання робочих органів розволокнювача (n_{opt}) та ступенем зношеності матеріалу (Dw), представлена у вигляді:

$$n_{opt} = n_0 \times (1 - \beta \times Dw), \quad (8)$$

де n_0 – оптимальна швидкість обертання для нового матеріалу; β – коефіцієнт коригування, значення якого залежить від типу волокон.

Результати досліджень впливу ступеня зношеності на механічні властивості волокон при руйнуванні структури матеріалу дозволили розширити розроблені математичні моделі шляхом введення додаткових коефіцієнтів, що враховують деградацію волокон в процесі експлуатації. Встановлено, що механічна міцність регенованих волокон (F_p) залежить від ступеня зношеності вихідного матеріалу (Dw) згідно з наступним виразом:

$$F_p = F_{p0} \times (1 - \gamma \times Dw), \quad (9)$$

де F_{p0} – міцність волокон, регенованих з нового матеріалу; γ – коефіцієнт деградації міцності волокон, значення якого залежить від типу волокон та умов експлуатації виробів.

Дослідження впливу температурного режиму на процес розволокнення дозволили включити в математичні моделі додаткові параметри, пов'язані з тепловим впливом на волокна. Встановлено, що підвищення температури в зоні розволокнення (T) до певного оптимального значення покращує пластичність волокон і знижує їх пошкодження при механічному впливі, що описується виразом:

$$D_p = D_{p0} \times e^{-\sigma \times (T - T_0)}, \quad (10)$$

де D_{p0} – ступінь пошкодження волокон при базовій температурі T_0 ; σ – температурний коефіцієнт зниження пошкодження волокон, значення якого залежить від типу волокон.

Експериментально визначено оптимальні температурні режими розволокнення для різних типів текстильних відходів: для бавовняних волокон, для синтетичних волокон, для змішаних матеріалів. Перевищення вказаних температур призводить до термічного пошкодження волокон і зниження їх міцності.

Вплив вологості матеріалу (W) на процес розволокнення та якість регенованих волокон також було формалізовано у вигляді математичної залежності:

$$L_{cp}' = L_{cp} \times (1 + \mu \times (W - W_0)^2), \quad (11)$$

де L_{cp}' – середня довжина регенованих волокон при вологості W ; L_{cp} – середня довжина регенованих волокон при базовій вологості W_0 ; μ – коефіцієнт впливу вологості, що залежить від типу волокон.

Розроблена математична модель передбачає наявність оптимального значення вологості (W_0), при якому досягається максимальне збереження довжини волокон. Відхилення від оптимального значення вологості у будь-який бік призводить до зниження якості регенованих волокон.

Поєднання впливів температури, вологості та швидкості обертання робочих органів на якість регенованих волокон описується комплексною моделлю:

$$Q = f(n, T, W, \rho, \delta, Dw) = Q_0 \times (1 - \alpha_1 \times n) \times e^{-\sigma \times (T - T_0)} \times (1 + \mu \times (W - W_0)^2) \times (1 - \alpha_2 \times \rho) \times (1 + \alpha_3 \times \delta) \times (1 - \gamma \times Dw), \quad (12)$$

де Q – інтегральний показник якості регенованих волокон; Q_0 – базовий показник якості; α_1 , α_2 , α_3 , σ , μ , γ – коефіцієнти впливу відповідних параметрів на якість регенованих волокон.

На основі розроблених математичних моделей створено адаптивну систему керування процесом розволокнення текстильних відходів, яка забезпечує оперативне коригування технологічних параметрів залежно від характеристик вихідної сировини та вимог до якості регенованих волокон. Адаптивна система керування включає наступні основні компоненти:

1. Підсистему моніторингу характеристик вихідної сировини.
2. Підсистему прогнозування якості регенованих волокон на основі розроблених математичних моделей.
3. Оптимізаційний модуль для визначення оптимальних технологічних параметрів.
4. Підсистему керування обладнанням для реалізації оптимальних режимів розволокнення.
5. Підсистему контролю якості регенованих волокон.

Реалізація адаптивної системи керування здійснюється на основі програмно-апаратного комплексу, що забезпечує збір даних від датчиків, обробку інформації, прогнозування якості продукції та формування керуючих впливів на виконавчі механізми обладнання для розволокнення. Математичною основою функціонування системи є розроблені регресійні та нейромережеві моделі, які забезпечують прогнозування показників якості регенерованих волокон у режимі реального часу.

Алгоритм функціонування адаптивної системи керування включає послідовність наступних операцій:

1. Аналіз характеристик вихідної сировини перед подачею на розволокнення.
2. Прогнозування якості регенерованих волокон за допомогою розроблених математичних моделей при різних комбінаціях технологічних параметрів.

Визначення оптимальних значень технологічних параметрів шляхом розв'язання оптимізаційної задачі:

$$F(n, T, W, \delta) = w1 \times Q(n, T, W, \delta) - w2 \times E(n, T, W, \delta) \rightarrow \max \quad (13)$$

при обмеженнях: $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$ $W_{\min} \leq W \leq W_{\max}$ $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$

де F – цільова функція оптимізації; Q – інтегральний показник якості регенерованих волокон; E – енергоємність процесу розволокнення; $w1, w2$ – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність підвищення якості волокон або зниження енергоємності процесу.

Порівняльний аналіз ефективності розробленої адаптивної системи керування процесом розволокнення та традиційних підходів до організації технологічного процесу показав суттєві переваги адаптивного підходу для всіх досліджуваних типів текстильних відходів. Застосування адаптивної системи керування дозволяє підвищити ефективність використання енергії, збільшити вихід якісних регенерованих волокон та знизити варіабельність їх характеристик.

Додатковим аспектом застосування розроблених математичних моделей є можливість прогнозування властивостей текстильних матеріалів, виготовлених з використанням регенерованих волокон. Встановлено залежності між характеристиками регенерованих волокон та властивостями текстильних матеріалів, що дозволяє ще на етапі налаштування процесу розволокнення прогнозувати характеристики кінцевого продукту.

Розроблені математичні моделі та методології оптимізації процесів розволокнення текстильних відходів створюють підґрунтя для розвитку інноваційних підходів до рециклінгу текстильних матеріалів у контексті циркулярної економіки. На основі проведених досліджень сформульовано рекомендації щодо інтеграції технологій розволокнення в циркулярні виробничі системи різного масштабу – від локальних виробництв до великих промислових комплексів.

Аналіз ресурсоефективності процесів розволокнення на основі розроблених математичних моделей дозволив визначити ключові показники для оцінювання екологічної ефективності технологій:

$$E_{col} = k9 \times \left(1 - \frac{E}{E_{max}}\right) + k10 \times Sr + k11 \times (1 - Ww), \quad (14)$$

де E_{col} – інтегральний показник екологічної ефективності; E – енергоємність процесу розволокнення; E_{max} – максимальна енергоємність серед порівнюваних технологій; Sr – ступінь розволокнення; Ww – частка відходів, що утворюються в процесі розволокнення; $k9, k10, k11$ – вагові коефіцієнти.

Розроблені прогностичні моделі якості регенерованих волокон інтегровано в методологію оцінювання життєвого циклу текстильних виробів, що дозволяє кількісно оцінити потенціал різних технологій розволокнення щодо зниження негативного впливу на довкілля. Порівняльний аналіз різних технологічних підходів до розволокнення бавовняних, синтетичних та змішаних текстильних відходів з використанням методології оцінювання життєвого циклу показав, що оптимізація технологічних параметрів на основі розроблених моделей дозволяє зменшити карбоновий слід процесів переробки.

Для оцінювання економічної ефективності впровадження оптимізованих технологій розволокнення розроблено модель, яка враховує як інвестиційні витрати на модернізацію обладнання, так і експлуатаційні витрати, пов'язані з енергоспоживанням та обслуговуванням:

$$E_{con} = \frac{Pr \times Qp - Cop}{Cinv}, \quad (15)$$

де E_{con} – показник економічної ефективності; Pr – ціна регенерованих волокон на ринку; Qp – продуктивність процесу розволокнення; Cop – експлуатаційні витрати; $Cinv$ – інвестиційні витрати на впровадження технології.

Результати досліджень щодо параметрів промислового обладнання для розволокнення дозволили розширити діапазон застосування розроблених моделей для різних типів обладнання та масштабів виробництва. Створено методику масштабування процесів розволокнення, яка дозволяє адаптувати оптимізаційні параметри для обладнання різної продуктивності без необхідності проведення повномасштабних експериментальних досліджень.

Для забезпечення адаптивності технологічних процесів розволокнення до мінливих умов ринку та вимог споживачів розроблено модель динамічної оптимізації технологічних параметрів:

$$F(t) = \int [0, T] (w1(t) \times Q(t) - w2(t) \times E(t)) dt \rightarrow \max, \quad (16)$$

де $F(t)$ – інтегральний показник ефективності процесу розволокнення за період часу $[0, T]$; $w1(t), w2(t)$ – динамічно змінювані вагові коефіцієнти, що враховують поточні ринкові умови; $Q(t)$ –

прогнозована якість регенованих волокон; $E(t)$ – прогнозована енергоємність процесу розволокнення.

Економічна ефективність застосування розроблених моделей та адаптивних систем керування для оптимізації процесів розволокнення підтверджена результатами впровадження на промислових підприємствах. Термін окупності інвестицій у модернізацію обладнання та впровадження адаптивних систем керування залежить від масштабу виробництва та типу текстильних відходів, що переробляються. Проведені дослідження створюють методологічну основу для подальшого розвитку технологій розволокнення текстильних відходів та інтеграції процесів рециклінгу в циркулярні виробничі системи. Розроблені математичні моделі та методології оптимізації можуть бути адаптовані для інших процесів механічної переробки текстильних матеріалів, таких як змішування регенованих волокон з первинною сировиною, формування нетканих матеріалів та виробництво композитів на основі текстильних відходів.

Таким чином, розроблені прогностичні моделі якості регенованих волокон забезпечують науково-методологічне підґрунтя для підвищення ефективності використання текстильних відходів у виробництві нових матеріалів, що відповідає принципам ресурсоефективності та сталого розвитку в контексті циркулярної економіки.

Висновки

У результаті проведених досліджень розроблено систему математичних моделей для прогнозування якості регенованих волокон при розволокненні текстильних відходів різного типу. Встановлено залежності між технологічними параметрами процесу розволокнення та основними показниками якості регенованих волокон. Визначено, що швидкість обертання робочих органів, температурний режим, вологість матеріалу та геометричні параметри обладнання мають визначальний вплив на якість регенованих волокон.

Запропоновано багатофакторну регресійну модель та нейромережевий підхід до прогнозування якості регенованих волокон, які дозволяють з високою точністю передбачати довжину, міцність та ступінь пошкодження волокон залежно від параметрів процесу розволокнення. На основі розроблених моделей створено адаптивну систему керування процесом розволокнення, яка забезпечує оптимальні технологічні режими для різних типів текстильних відходів.

Впровадження розроблених моделей та адаптивної системи керування дозволяє підвищити ефективність використання енергії при розволокненні текстильних відходів, збільшити вихід якісних регенованих волокон та розширити можливості їх застосування у виробництві нових текстильних матеріалів, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Література

1. Aronsson J., Persson A. Tearing of post-consumer cotton T-shirts and jeans of varying degree of wear. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. Vol. 15. P. 1558925020901322.
2. Lindström K. Improving mechanical textile recycling by lubricant pre-treatment to mitigate length loss of fibers. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. P. 8706.
3. Lu L. Current recycling strategies and high-value utilization of waste cotton. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 856. P. 159164.
4. Pensupa N. Recent trends in sustainable textile waste recycling methods: Current situation and future prospects. *Topics in Current Chemistry*. 2017. Vol. 375, No. 5. P. 1–39.
5. Piribauer B., Bartl A. Textile recycling processes, state of the art and current developments: a mini review. *Waste Management & Research*. 2019. Vol. 37. P. 112–119.
6. Thompson P., Willis P., Morley N. A review of commercial textile fibre recycling technologies. Banbury: WRAP, 2012.
7. Ütebay B., Çelik P., Çay A. Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 222. P. 29–35.

References

1. Aronsson, J., & Persson, A. (2020). Tearing of post-consumer cotton T-shirts and jeans of varying degree of wear. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925020901322. <https://doi.org/10.1177/1558925020901322>
2. Lindström, K. (2020). Improving mechanical textile recycling by lubricant pre-treatment to mitigate length loss of fibers. *Sustainability*, 12(21), 8706. <https://doi.org/10.3390/su12218706>
3. Lu, L. (2023). Current recycling strategies and high-value utilization of waste cotton. *Science of The Total Environment*, 856, 159164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159164>
4. Pensupa, N. (2017). Recent trends in sustainable textile waste recycling methods: Current situation and future prospects. *Topics in Current Chemistry*, 375(5), 1–39. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0165-0>
5. Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. *Waste Management & Research*, 37(2), 112–119. <https://doi.org/10.1177/0734242X18819277>
6. Thompson, P., Willis, P., & Morley, N. (2012). A review of commercial textile fibre recycling technologies. Banbury: WRAP.
7. Ütebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2019). Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. *Journal of Cleaner Production*, 222, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.033>