

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-23>

УДК 677.021.123:519.85

КАЛІНСЬКИЙ ЄВГЕН

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2605-8759>e-mail: kalinskij.evgen@kntu.edu.ua**ЄВТУШЕНКО ВАЛЕНТИНА**

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8720-5804>e-mail: evtushenko.valentyna@kntu.edu.ua**РАСТОРГУЄВА МАРІЯ**

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-2612-508X>e-mail: rastorgueva.maryna@kntu.edu.ua**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ ІЗ РІЗНИХ ВИДІВ ВОЛОКОН**

У статті розглянуто питання математичного моделювання та оптимізації складу багатокомпонентних сумішей із різних видів волокон із урахуванням технологічних та економічних вимог. Обґрунтовано доцільність переходу від емпіричного підбору складу до математично обґрунтованого визначення співвідношення волокнистих компонентів. Удосконалено математичну модель задачі лінійного програмування, що передбачає можливість роботи з довільною кількістю компонентів і обмежень. Для визначення оптимального складу застосовано двофазний симплекс-метод із попереднім аналізом системи обмежень та вдосконалим механізмом переходу між етапами обчислень. Розширено функціональні можливості моделі за рахунок аналізу двоїстих оцінок, що дає змогу визначати вплив окремих вимог до властивостей суміші на її мінімальну вартість. Передбачено процедуру діагностики нерозв'язних задач та автоматичного визначення конфліктних обмежень. Практичну реалізацію запропонованого підходу здійснено у вебдодатку **Composite 4.2.0**, який забезпечує формування математичної задачі, розрахунок оптимального складу суміші, визначення її мінімальної вартості, аналіз двоїстих оцінок та виявлення несумісних вимог. Розроблений підхід розширює можливості математичної оптимізації під час проектування багатокомпонентних текстильних матеріалів та забезпечує підтримку технологічних і економічних рішень.

Ключові слова: волокна, суміші, математичне моделювання, лінійне програмування, оптимізація складу, двофазний симплекс-метод, двоїсті оцінки, , Composite 4.2.0.

KALINSKY EUGEN, YEVTUSHENKO VALENTYNA, RASTORHUEVA MARIIA

Kherson National Technical University

**MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF MULTICOMPONENT
MIXTURES FROM VARIOUS TYPES OF FIBERS**

The article addresses the mathematical modeling and optimization of multicomponent textile fiber blends. The study's relevance stems from the need to obtain materials with specified quality characteristics while minimizing raw material costs. To achieve this, an improved mathematical model and software for optimizing multicomponent fiber blend compositions are proposed.

The problem is formulated as a linear programming model, where decision variables represent the proportions of individual fiber components. The objective function minimizes total raw material costs while satisfying technological, economic, and quality requirements.

To solve the problem, an enhanced computational approach based on the two-phase simplex method is proposed. The first phase determines a feasible blend composition, while the second phase provides economic optimization using a preserved feasible basis. A preliminary analysis of the constraint system allows linearly dependent conditions to be identified and removed.

A key feature of the model is the analysis of dual estimates, which assesses the impact of individual quality requirements on the optimal blend's cost, alongside a diagnostic procedure for identifying mutually incompatible constraints. This enables timely adjustment of quality limits or available fiber ranges.

The proposed approach was implemented in the Composite 4.2.0 web-based software complex. The application allows users to define fiber components, specify costs and constraints, calculate optimal compositions and minimum costs, analyze dual estimates, and diagnose conflicting requirements. The developed complex expands the capabilities of mathematical optimization for the technological and economic substantiation of textile blends.

Keywords: multicomponent textile blend, mathematical modeling, linear programming, optimization, two-phase simplex method, dual estimates, constraint diagnostics, Composite 4.2.0.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.08.2026

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/)

© Калінський Євген, Євтушенко Валентина, Расторгуєва Марія

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

Сучасний етап розвитку текстильної галузі ставить перед виробниками завдання забезпечення високої якості продукції за умов мінімізації витрат на сировину. Ефективним шляхом досягнення цієї мети є використання багатокомпонентних сумішей із різних видів волокон, оскільки раціональне поєднання натуральних, штучних і синтетичних матеріалів дозволяє сформувати властивості готової продукції за мінімально можливою вартістю сировини [1]. Проте проектування таких сумішей вимагає одночасного врахування

складного комплексу суперечливих технологічних та економічних чинників [2]. Зростання номенклатури сировини та жорсткі вимоги до показників якості зумовлюють необхідність переходу від емпіричного підбору до математичного моделювання [3]. Водночас наявні методи лінійного програмування часто обмежуються фіксованою кількістю змінних і не завжди забезпечують повноцінну діагностику конфліктних обмежень у разі системної несумісності [4]. Тому розробка вдосконалених моделей та гнучких програмних інструментів, що інтегрують оптимізацію, аналіз двоїстих оцінок і діагностику несумісності, є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз досліджень та публікацій

Питанням удосконалення процесу проєктування текстильних матеріалів із заданим комплексом властивостей приділяється значна увага у вітчизняній та закордонній науковій літературі. Зокрема, у працях М. Й. Расторгуєвої, О. В. Горізової та О. В. Зокори досліджено особливості формування багатокомпонентних сумішей із використанням модифікованих луб'яних волокон, що дозволяє обґрунтувати доцільність введення натуральної сировини до складу сучасних тканин [1].

Водночас розвиток математичних методів оптимізації асортименту демонструє високу ефективність застосування апарату лінійного програмування. Дослідження R. Chanda присвячені застосуванню лінійного програмування для максимізації прибутку та оптимізації витрат при формуванні сумішей [2]. Праці G. W. Woubante розширюють цей підхід безпосередньо на швейно-текстильну галузь, вирішуючи завдання оптимізації в умовах виробничих обмежень [3]. Крім того, у роботах O. Nosakhare та O. A. Ezenwa розглянуто моделі ресурсного планування на основі методів лінійного програмування, що підтверджує універсальність математичного моделювання [4]. Важливим етапом практичної реалізації цього напрямку стало створення спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема комп'ютерної програми «Composite», розробленої О. В. Серовим, М. Й. Расторгуєвою та О. В. Горізовою [5], що дозволило автоматизувати розрахунки параметрів сумішей.

Проте, незважаючи на наявні напрацювання, недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції багатокритеріальної оптимізації з поглибленим аналізом двоїстих оцінок та автоматизованою діагностикою несумісності технологічних вимог у сучасному програмному середовищі.

Формулювання цілей статті

Метою статті є розробка вдосконалених математичних моделей та програмного забезпечення для оптимізації багатокомпонентних сумішей із різних видів волокон з урахуванням двоїстих оцінок і діагностики несумісності обмежень.

Виклад основного матеріалу

Розробка складу багатокомпонентних сумішей із різних видів волокон належить до категорії складних інженерно-технологічних завдань. Цей процес вимагає паралельного узгодження низки критеріїв: технічних, фізико-механічних та фінансових. Головна мета такого проєктування полягає у знаходженні оптимальне співвідношення волокон, яке задовольнить нормативні показники якості майбутнього текстилю за мінімальних витрат на закупівлю сировини. Кожна складова суміші вирізняється специфічним комплексом властивостей (фізико-механічних, гігієнічних та структурних) та ринковою вартістю, що в сукупності формує кінцеві експлуатаційні властивості й собівартість готової продукції [6].

Розширення номенклатури штучних, синтетичних і натуральних волокон суттєво збільшує простір для пошуку можливих рецептурних поєднань. Однак, значна варіативність компонентів створює додаткові труднощі під час прийняття рішень, оскільки багатоцільова оптимізація має нелінійний характер. Зміна масової частки навіть одного компонента здатна одночасно підвищувати певні експлуатаційні характеристики (скажімо, стійкість до зношування або збереження форми) та водночас знижувати інші (зокрема, гігієнічні або ергономічні властивості) [7].

Більше того, мінливість сучасного ринкового середовища змушує підприємства оперативно адаптуватися до цінкових коливань без втрати споживчих властивостей продукції. У зв'язку з цим пошук раціональних співвідношень сировини неможливий без впровадження інструментів математичного моделювання та системного аналізу, які дозволяють ефективно поєднувати нормативні вимоги до якості з економічною ефективністю виробництва [8].

Саме тому виникає об'єктивна необхідність застосування формалізованих методів проєктування. За таких умов математичне моделювання дає змогу формалізувати залежність показників готового матеріалу від частки окремих волокнистих компонентів і здійснювати цілеспрямований пошук оптимального складу. Такий підхід дає можливість перейти від емпіричного підбору складу до математично обґрунтованого визначення співвідношення волокон, порівнювати можливі варіанти та оцінювати вплив окремих вимог на кінцевий результат.

Зі збільшенням кількості волокнистих компонентів та показників якості суттєво зростають вимоги до адекватності математичної моделі та обчислювальної складності алгоритмів її оптимізації. Сучасний алгоритмічний інструментарій має бути адаптованим до роботи у багатовимірному просторі змінних за наявності чисельних обмежень різної природи — технологічних, економічних і нормативних. До ключових функціональних вимог такого алгоритму належать масштабованість (здатність коректно опрацьовувати довільну

кількість сировинних компонентів і критеріїв оцінювання), достовірність (точне визначення області допустимих рішень з урахуванням граничних діапазонів фізико-механічних властивостей), ефективність пошуку (забезпечення збіжності процесу та знаходження раціонального оптимуму) і діагностична здатність (ідентифікація причин несумісності обмежень у ситуаціях, коли задані нормативні вимоги є взаємовиключними) (рис. 1). Завдяки такому комплексному підходу обчислювальний інструментарій перетворюється на надійну систему підтримки інженерних рішень.

Таким чином, математична оптимізація складу багатокомпонентних текстильних сумішей є не лише засобом мінімізації вартості сировини, а й інструментом обґрунтування технологічних рішень щодо співвідношення волокон та забезпечення заданого рівня властивостей готового матеріалу.



Рис.1. Функціональні вимоги до алгоритму оптимізації

Для формалізації задачі проектування складу багатокомпонентної суміші введемо змінну x_j , яка характеризує частку j -го волокнистого компонента у складі суміші, де $j=1, \dots, n$. Кожному компоненту відповідають його властивості та вартість. Такий підхід відповідає загальній постановці задач лінійного програмування, у яких невідомі змінні визначають рівень використання окремих компонентів, а система лінійних обмежень задає допустиму область розв'язків [9, 10].

Основною умовою формування багатокомпонентної текстильної суміші є забезпечення суворої відповідності між масовими частками всіх компонентів та їх загальною кількістю. Якщо частки волокон виражаються у відсотках, незмінною вимогою є те, що їхня сума має становити рівно 100 %. Математично ця умова нормалізації описується лінійним рівнянням-обмеженням:

$$\sum_{j=1}^n x_j = 100.$$

Окрім забезпечення заданого компонентного складу суміші, під час її проектування необхідно формалізувати вимоги до фізико-механічних та експлуатаційних характеристик майбутнього матеріалу. Для кожного показника якості встановлюється відповідна вимога. Якщо значення показника має бути не нижчим за встановлений рівень, обмеження записується у вигляді:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i,$$

де a_{ij} — значення i -го показника для j -го волокнистого компонента;
 b_i — задане мінімально допустиме значення показника.

Водночас для параметрів, які мають обмеження умови формуються інакше. Для показників, значення яких не повинно перевищувати встановленої межі, використовується відповідне обмеження:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i.$$

На додачу до обмежень на показники якості готової продукції, під час формування складу сумішей часто виникає потреба контролювати вміст окремих видів сировини (наприклад, для забезпечення заданого рівня гігроскопічності, повітропроникності або обмеження вмісту компонентів із високою електростатичною активністю). З огляду на це, можуть також задаватися обмеження на частку окремих компонентів:

$$l_j \leq x_j \leq u_j,$$

де l_j та u_j — відповідно мінімально та максимально допустимі частки j -го волокна.

Браховуючи сукупність сформульованих обмежень за показниками якості та компонентним складом, завдання проектування полягає у пошуку раціональних масових часток волокон $x_1, x_2, \dots, x_n$, які забезпечують мінімізацію витрат на сировину за повної відповідності нормативним вимогам. Формалізована цільова функція задачі буде мати такий вигляд:

$$\min Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j,$$

де Z — загальна вартість суміші;

c_j — вартість одиниці j -го волокна.

Усі сформульовані вище умови — рівняння нормалізації масових часток, обмеження за показниками якості готового матеріалу, граничні значення вмісту окремих волокон, а також лінійна цільова функція мінімізації вартості сировини — утворюють єдину замкнену математичну систему. Формування цільової функції та системи лінійних обмежень дає змогу представити задачу проектування складу суміші як класичну задачу лінійного програмування. Це дозволяє задіяти ефективний арсенал чисельних методів оптимізації (зокрема симплекс-метод) для безпосереднього знаходження раціонального розв'язку в геометричному просторі допустимих рецептур. Основи такого математичного представлення, а також методи пошуку оптимального розв'язку детально розглядаються у працях з теорії лінійної оптимізації [9, 10].

Для визначення оптимального складу багатокомпонентної суміші в розробленій моделі застосовується двофазний симплекс-метод. Необхідність застосування саме цього ітераційного підходу зумовлена специфікою створення сумішей у текстильному виробництві, а саме, наявність жорстких рівнянь нормалізації та перехресних обмежень-нерівностей унеможливує очевидне призначення початкової базисної точки. Процедура реалізації методу базується на чіткому розмежуванні двох етапів. На першому етапі за допомогою введення штучних змінних та оптимізації допоміжної цільової функції здійснюється пошук початкового базисного розв'язку, що повністю задовольняє всю систему технологічних і якісних обмежень. Після досягнення цього допустимого базису штучні змінні виводяться з розрахунку, і розпочинається другий етап. На цьому етапі відбувається спрямоване переміщення вздовж межі багатогранника допустимого складу у напрямку глобального мінімуму основної цільової функції, яка відображає загальну вартість волокнистої сировини.

Використання двофазної процедури дає змогу чітко розділити етап пошуку допустимого складу суміші та його подальшу економічну оптимізацію, гарантуючи знаходження раціонального розв'язку без порушення нормативних вимог до якості текстильної продукції [10, 11].

Описана двоетапна процедура лінійного програмування створює надійне математичне підґрунтя для розрахунку складу сумішей із волокон. Водночас для успішного залучення чисельних методів критично важливим є етап підготовки початкових даних. Саме тому однією з особливостей удосконаленої моделі є автоматичне опрацювання системи обмежень перед виконанням симплекс-процедури. На цьому етапі перевіряється, чи містить система лінійно залежні обмеження. Наявність таких рядків не додає нових вимог до складу суміші, оскільки вони можуть бути отримані як лінійні комбінації інших обмежень. Їх автоматичне виявлення та вилучення дає можливість скоротити математичний опис задачі без зміни множини її допустимих розв'язків. Це особливо важливо під час формування задач із великою кількістю показників якості, коли окремі вимоги можуть виявитися взаємопов'язаними [10, 12, 13].

Окремо вдосконалено механізм переходу між двома етапами симплекс-обчислень. Після завершення першого етапу сформований допустимий базис не замінюється новим, а використовується як вихідний для оптимізації основної цільової функції. Для цього отримана таблиця першого етапу приводиться до канонічного вигляду відносно сформованого базису, після чого на її основі формується таблиця другого етапу. У ній замість допоміжної цільової функції використовується функція мінімізації вартості волокнистої суміші. Така послідовність операцій забезпечує узгодженість між етапом визначення допустимого розв'язку та етапом його оптимізації й запобігає втраті знайденого базису під час переходу до основної цільової функції [10, 11].

Запропоновані вдосконалення змінюють послідовність опрацювання задачі оптимізації: перед безпосереднім пошуком оптимального складу здійснюється перевірка сформованої системи вимог, усуваються обмеження, які не несуть самостійної інформації, та встановлюється можливість їх одночасного виконання. За наявності допустимого розв'язку сформований на першому етапі симплекс-процедури базис без повторного пошуку використовується для подальшої мінімізації вартості суміші. Завершальним елементом є інтерпретація отриманого рішення за допомогою двоїстих оцінок, що дає змогу визначити вплив окремих технологічних вимог на економічний результат. У разі відсутності допустимого розв'язку додаткова процедура забезпечує локалізацію конфліктних вимог, які потребують коригування. Узагальнену послідовність зазначених етапів та взаємозв'язок процедур наведено на рис. 2.

Ще одним напрямом удосконалення є розширення результатів оптимізації за рахунок аналізу двоїстих оцінок. Отримання оптимального складу саме по собі визначає лише значення змінних задачі, тоді як аналіз двоїстих характеристик дає можливість встановити, які з установлених вимог найбільше впливають на економічний результат. Для оптимального базису двоїсту оцінку i -го обмеження можна визначити за співвідношенням [14]:

$$y_i = c^B T B^{-1} e_i$$

де c^B — вектор коефіцієнтів цільової функції для базисних змінних;

B^{-1} — обернена базисна матриця;

e_i — одиничний вектор i -го обмеження.

Значення y_i показує, наскільки зменшиться мінімальна вартість суміші при послабленні i -ї вимоги на одиницю, що дає технологу інструмент для ранжування вимог за їх впливом на собівартість. Додатково формалізовано діагностику нерозв'язних задач: при неможливості одночасного виконання всіх вимог модель ідентифікує конкретні конфліктні обмеження замість загальної відмови.

Отримані значення характеризують **чутливість оптимальної вартості суміші до зміни правої частини відповідного обмеження** в межах допустимого діапазону зміни базису. Таким чином, двоїсті оцінки дають змогу не лише встановити оптимальний склад суміші, а й визначити, які вимоги до властивостей матеріалу є найбільш «чутливими» до вартості. Це створює додаткову інформацію для технологічного аналізу: зміна менш значущих обмежень може практично не впливати на вартість оптимального складу, тоді як послаблення або посилення найбільш впливових вимог може суттєво змінювати економічний результат.

Під час формування складу багатокомпонентної суміші можливі випадки, коли сукупність установлених вимог до властивостей матеріалу є взаємно несумісною. У такій ситуації жодна комбінація волокнистих компонентів не забезпечує одночасного виконання всіх заданих обмежень. Причиною може бути суперечливий вплив окремих компонентів на властивості матеріалу або надмірно вузькі межі, встановлені для окремих показників.

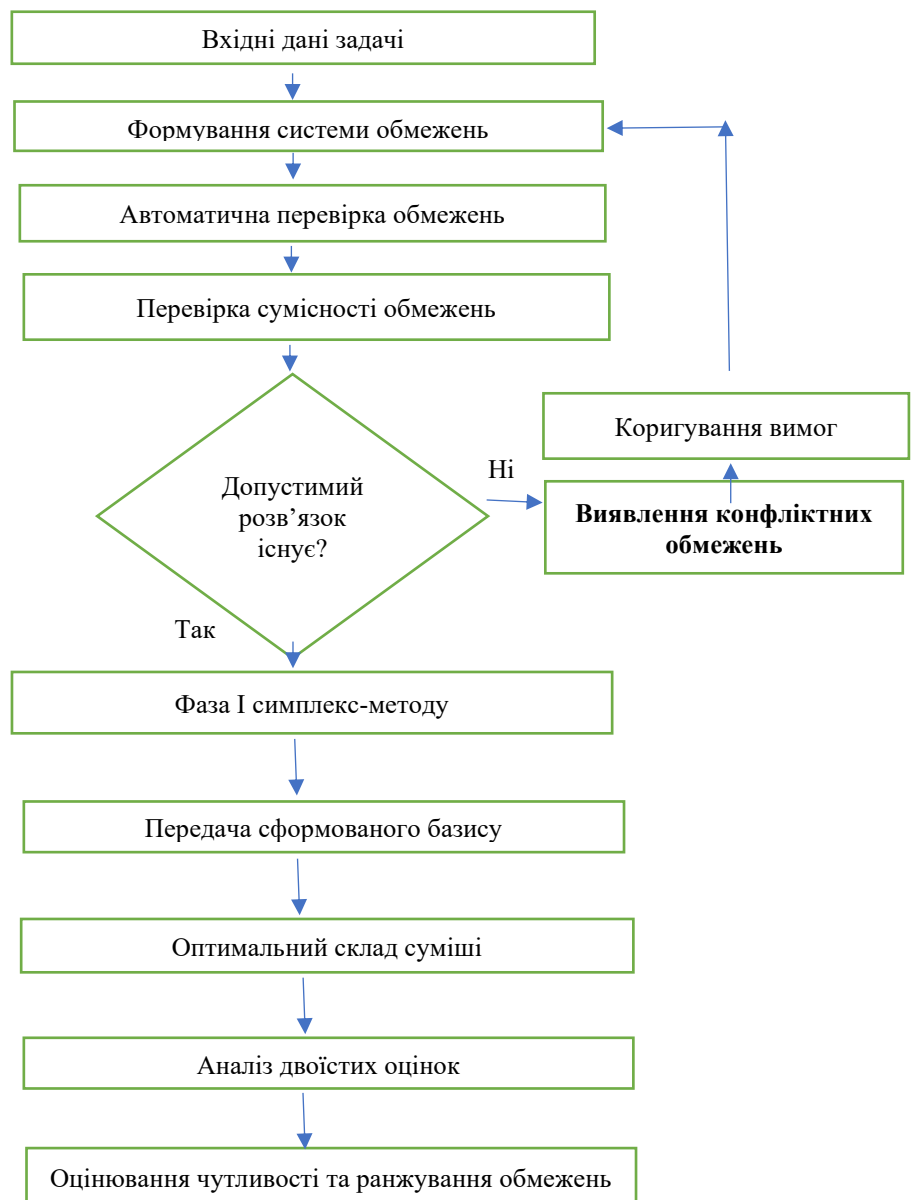


Рис.2. Структурно-логічна схема вдосконаленої моделі оптимізації складу багатокомпонентної волокнистої суміші

Сам факт відсутності допустимого розв'язку не дає технологу достатньої інформації для коригування поставленої задачі. Тому в розробленому підході передбачено додаткову процедуру аналізу системи обмежень, спрямовану на встановлення вимог, спільне виконання яких у заданих умовах є неможливим.

Результатом такої процедури є визначення конфліктних обмежень, що дає змогу пов'язати математичну нерозв'язність із конкретними вимогами до властивостей суміші. Отримана інформація може використовуватися для подальшого коригування математичної постановки: перегляду граничного значення певного показника, зміни допустимого інтервалу або розширення переліку волокнистих компонентів, доступних для формування суміші.

Таким чином, діагностика нерозв'язності розглядається не лише як засіб контролю коректності математичної задачі, а як інструмент підтримки технологічного рішення, що допомагає встановити причину неможливості отримання складу, який одночасно відповідає всім заданим вимогам.

Практичну реалізацію розробленого математичного підходу виконано у програмному комплексі Composite 4.2.0, функціонування якого забезпечується через веббраузер. Такий формат дає можливість працювати з моделлю без попереднього встановлення спеціалізованого програмного забезпечення та не прив'язує її використання до конкретної операційної системи.

Розроблена версія відрізняється від попередньої реалізації [5], створеної мовою Assembler для середовища Windows, не лише способом організації програмного середовища, а й розширеним набором функцій математичного аналізу. Зокрема, реалізовано можливість формування задачі залежно від фактичного переліку волокнистих компонентів і показників, які необхідно врахувати під час проєктування складу суміші.

Інтерактивний інтерфейс Composite 4.2.0 дає змогу користувачеві самостійно сформувати вихідні дані задачі та отримати результати оптимізації. Передбачено можливість:

- визначати склад волокнистих компонентів, які розглядаються як можливі складові суміші;
- підключати або виключати окремі показники якості залежно від призначення матеріалу;
- задавати вартість кожного компонента;
- встановлювати необхідні обмеження щодо властивостей суміші;
- розраховувати оптимальні частки волокнистих компонентів;
- визначати мінімальну вартість отриманого складу;
- аналізувати двоїсті оцінки встановлених обмежень;
- отримувати діагностичну інформацію у випадку відсутності допустимого розв'язку.

Отже, Composite 4.2.0 поєднує в одному програмному середовищі формування математичної задачі, пошук оптимального складу, оцінювання впливу окремих обмежень та діагностику їх несумісності. Це розширює практичні можливості використання математичної оптимізації під час проєктування багатокomпонентних сумішей із різних видів волокон та дає змогу оперативно оцінювати як економічну доцільність отриманого складу, так і вплив установлених вимог на результат розрахунку.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного дослідження розроблено вдосконалену математичну модель та вебдодаток Composite 4.2.0 для оптимізації складу багатокomпонентних текстильних сумішей. Застосування двофазного симплекс-методу з попереднім аналізом обмежень та вдосконаленим механізмом переходу між фазами забезпечило високу стійкість обчислень для довільної кількості змінних. Інтеграція двоїстих оцінок і процедури автоматичного виявлення конфліктних вимог перетворила програмний комплекс на ефективний інструмент технологічного та економічного аналізу. Перспективи подальших розвідок пов'язані з адаптацією розробленої моделі для проєктування спеціальних технічних матеріалів, урахуванням виробничих коливань показників якості та сировини, а також додаванням блоку багатокритеріальної оптимізації для оцінювання екологічних і економічних характеристик нових сумішей.

Література

1. Расторгуєва М. Й., Горізонтова О. В., Загора О. В. Проектування багатокomпонентних сумішей з використанням модифікованих луб'яних волокон. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2009. № 2. С. 90–94.
2. Chanda R. A Study on Application of Linear Programming on Product Mix for Profit Maximization and Cost Optimization / R. Chanda // Indian Journal of Science and Technology. — 2022. — Vol. 15, Issue 22. — P. 1067–1074. DOI: <https://doi.org/10.17485/IJST/v15i22.164>
3. Woubante G. W. The Optimization Problem of Product Mix and Linear Programming Applications: Case Study in the Apparel Industry / G. W. Woubante // Open Science Journal. — 2017. — Vol. 2, Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.23954/osj.v2i2.853>
4. Nosakhare O. Optimization of Resources with the Aid of Linear Programming Model in Steve Shoe Production Centre, Enugu / O. Nosakhare, O. A. Ezenwa // International Journal of Research - Granthaalayah. — 2018. — Vol. 6, Issue 9. — P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1436782>
5. Комп'ютерна програма «Composite»: А. с. 19191 Україна / О. В. Серов, М. Й. Расторгуєва, О. В. Горізонтова — № 19258; заявл. 16.11.2006 ; опубл. 10.01.2007.

6. An Integrated Approach to the Analysis of Multi-Component Fiber Blending. Part III: Analysis of Interactive Fiber Blending / Y. E. Mogahzy et al. *Textile Research Journal*. 2005. Vol. 75, no. 12. P. 833–845. URL: <https://doi.org/10.1177/0040517505053899>
7. Effect of blending ratio on the comprehensive properties and tensile damage mechanism of meta-aramid/flame-retardant viscose blended yarns / W. Xu et al. *Journal of Industrial Textiles*. 2026. Vol. 56. URL: <https://doi.org/10.1177/15280837261481290>
8. Chattopadhyay R. A Review on Mathematical Modeling for Textile Processes. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*. 2015. Vol. 96, no. 2. P. 89–98. URL: <https://doi.org/10.1007/s40034-015-0057-1>
9. Dantzig G. B., Thapa M. N. Linear programming 1: Introduction. Springer, 1997. 302 p. URL: <https://doi.org/10.1007/b97672>.
10. Vanderbei R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions. 4th ed. New York : Springer, 2014. 466 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7630-6>.
11. Dantzig G. The simplex method // Linear programming and extensions. Princeton : Princeton University Press, 2016. P. 94–119. URL.: <https://doi.org/10.1515/9781400884179-006>.
12. Vanderbei R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions. 4th ed. New York : Springer, 2014. 466 p.. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7630-6>
13. Tits A. L., Absil P. A., Woessner W. P. Constraint Reduction for Linear Programs with Many Inequality Constraints. *SIAM Journal on Optimization*. 2006. Vol. 17, no. 1. P. 119–146. URL: <https://doi.org/10.1137/050633421>
14. Vella D. C. Invitation to Linear Programming and Game Theory. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. Chapter 4 : Sensitivity Analysis and Duality. P. 148–184. <https://doi.org/10.1017/9781108568166.006>

References

1. Rastorhuieva M. Y., Horizontova O. V., Zakora O. V. Proektuvannya bahatokomponentnykh sumishei z vykorystanniam modyfikovanykh lubianykh volokon. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2009. № 2. S. 90–94.
2. Chanda R. A Study on Application of Linear Programming on Product Mix for Profit Maximization and Cost Optimization / R. Chanda // Indian Journal of Science and Technology. — 2022. — Vol. 15, Issue 22. — P. 1067–1074. DOI: <https://doi.org/10.17485/IJST/v15i22.164>
3. Woubante G. W. The Optimization Problem of Product Mix and Linear Programming Applications: Case Study in the Apparel Industry / G. W. Woubante // Open Science Journal. — 2017. — Vol. 2, Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.23954/osj.v2i2.853>
4. Nosakhare O. Optimization of Resources with the Aid of Linear Programming Model in Steve Shoe Production Centre, Enugu / O. Nosakhare, O. A. Ezenwa // International Journal of Research - Granthaalayah. — 2018. — Vol. 6, Issue 9. — P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1436782>
5. Kompiuterna prohrama «Composite»: A. s. 19191 Ukraina / O. V. Sierov, M. Y. Rastorhuieva, O. V. Horizontova — № 19258; zaiavl. 16.11.2006 ; opubl. 10.01.2007.
6. An Integrated Approach to the Analysis of Multi-Component Fiber Blending. Part III: Analysis of Interactive Fiber Blending / Y. E. Mogahzy et al. *Textile Research Journal*. 2005. Vol. 75, no. 12. P. 833–845. URL: <https://doi.org/10.1177/0040517505053899>
7. Effect of blending ratio on the comprehensive properties and tensile damage mechanism of meta-aramid/flame-retardant viscose blended yarns / W. Xu et al. *Journal of Industrial Textiles*. 2026. Vol. 56. URL: <https://doi.org/10.1177/15280837261481290>
8. Chattopadhyay R. A Review on Mathematical Modeling for Textile Processes. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*. 2015. Vol. 96, no. 2. P. 89–98. URL: <https://doi.org/10.1007/s40034-015-0057-1>
9. Dantzig G. B., Thapa M. N. Linear programming 1: Introduction. Springer, 1997. 302 p. URL: <https://doi.org/10.1007/b97672>.
10. Vanderbei R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions. 4th ed. New York : Springer, 2014. 466 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7630-6>.
11. Dantzig G. The simplex method // Linear programming and extensions. Princeton : Princeton University Press, 2016. P. 94–119. URL.: <https://doi.org/10.1515/9781400884179-006>.
12. Vanderbei R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions. 4th ed. New York : Springer, 2014. 466 p.. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7630-6>
13. Tits A. L., Absil P. A., Woessner W. P. Constraint Reduction for Linear Programs with Many Inequality Constraints. *SIAM Journal on Optimization*. 2006. Vol. 17, no. 1. P. 119–146. URL: <https://doi.org/10.1137/050633421>
14. Vella D. C. Invitation to Linear Programming and Game Theory. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. Chapter 4 : Sensitivity Analysis and Duality. P. 148–184. <https://doi.org/10.1017/9781108568166.006>