

УДК 004.942:655.3.066

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ DTF-ДРУКУ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПОНУВАННЯ МАКЕТІВ

Ю. І. Петрів¹, П. І. Шепіта²

1. Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, Львів 79013, Україна,
<https://orcid.org/0009-0005-0547-9801>, e-mail: yurii.i.petriv@lpnu.ua

2. Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, Львів 79013, Україна,
<https://orcid.org/0000-0001-8134-8014>, e-mail: petro.i.shepita@lpnu.ua

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності технологічного процесу DTF-друку за рахунок автоматизованого компонування макетів на рулонній PET-плівці. Обґрунтовано, що ефективність DTF-виробництва визначається не лише якістю друку, стабільністю кольоропередачі та параметрами термоперенесення, а й раціональним використанням матеріалів на етапі додрукарської підготовки. Показано, що ручне компонування макетів у графічному редакторі або RIP-середовищі залежить від досвіду оператора, потребує додаткового часу та може призводити до нераціонального використання плівки, появи порожніх зон, помилок у зазорах, накладань або неправильній орієнтації зображень.

Запропоновано розглядати компонування макетів у DTF-друці як прикладну задачу двовимірного розміщення об'єктів на рулонному матеріалі фіксованої ширини та змінної довжини. У роботі проаналізовано можливість застосування алгоритмів компонування, зокрема shelf-алгоритмів, guillotine packing, skyline, maximal rectangles, генетичних алгоритмів та підходів scheduled nesting. Формалізовано основні вхідні параметри задачі, серед яких розміри макетів, ширина рулону, технологічний зазор, допустимість повороту та виробничі пріоритети. Вихідним результатом системи є оптимізована карта розміщення макетів із координатами кожного елемента, обраною орієнтацією та розрахованим коефіцієнтом використання матеріалу.

Запропонований підхід створює основу для подальшого розроблення програмного модуля автоматизованого компонування макетів у DTF-друці, що дасть змогу зменшити матеріальні втрати, скоротити час додрукарської підготовки та підвищити стабільність виробничого процесу

Ключові слова. DTF-друк; автоматизоване компонування; nesting; PET-плівка; додрукарська підготовка; оптимізація розміщення макетів; двовимірне пакування; bin packing; технологічний зазор; коефіцієнт використання матеріалу; рулонний матеріал.

Постановка проблеми. Технологія DTF (Direct-to-Film) друку набула широкого поширення у сфері персоналізованого текстильного виробництва завдяки своїй здатності відтворювати повнокольорові зображення з високою деталізацією на широкому асортименті тканин без попередньої обробки. Технологічний процес DTF-друку передбачає формування зображення на полімерній трансферній плівці, нанесення термоплавкого клейового порошку, його термофіксацію та подальше перенесення зображення на текстильний виріб під дією температури і тиску [1, 2].

Водночас ефективність DTF-друку визначається не лише якістю відтворення зображення, стабільністю кольоропередачі, властивостями використовуваних матеріалів та параметрами термоперенесення. Важливе значення має також етап додрукарської підготовки, зокрема компонування макетів на рулонній плівці. Саме на цьому етапі задаються схема використання матеріалу, технологічні зазори між макетами, порядок розміщення замовлень, можливість повороту зображень та раціональність використання ширини рулону [3, 4].

У практичних умовах виробництва компонування макетів часто виконується вручну оператором у графічному редакторі або у RIP. Такий підхід є гнучким, однак значною мірою залежить від досвіду виконавця, його уважності та часу, доступного на підготовку виробничого файлу. У результаті виникають ризики нераціонального використання плівки, появи надмірних порожніх ділянок, помилок у розміщенні макетів, неправильного групування замовлень або повторного виконання додрукарських операцій [5].

Проблема раціонального розміщення різнорозмірних елементів на матеріалі відома у поліграфії, текстильній, швейній, металообробній та інших галузях як задача компонування або розкрою (англ. nesting). Її сутність полягає у пошуку такого розташування об'єктів на матеріалі обмеженої ширини, за якого забезпечується відсутність перетинів між елементами та мінімізується використана довжина матеріалу або площа відходів [6, 7]. У поліграфічному виробництві близькою за змістом є концепція gang-run printing, яка передбачає об'єднання кількох замовлень на одному друкарському аркуші з метою зниження виробничих витрат і підвищення ефективності використання матеріалу [8].

Для DTF-друку задача автоматизованого компонування має прикладну специфіку. Об'єктами розміщення є цифрові макети трансферів, матеріалом – рулонна PET-плівка, а основними технологічними обмеженнями виступають ширина рулону, мінімальні зазори між макетами, допустимість або заборона повороту зображень, вимоги до подальшого вирізання, ідентифікації замовлень та збереження якості перенесення зображення на текстиль [2, 9].

Актуальність дослідження посилюється тим, що сучасні підходи до автоматизованого компонування вже не обмежуються лише мінімізацією матеріальних відходів. У динамічних виробничих середовищах компонування

доцільно розглядати разом із плануванням замовлень, строками виконання, виробничими пріоритетами та загальною собівартістю процесу [10]. Для умов DTF-друку це означає необхідність переходу від ручного макетування до спеціалізованої автоматизованої системи, яка здатна враховувати геометричні, технологічні та організаційні обмеження виробництва.

Отже, науково-прикладна проблема полягає у відсутності формалізованого підходу до автоматизованого компонування макетів у технологічному процесі DTF-друку, який би одночасно забезпечував мінімізацію втрат плівки, скорочення часу додрукарської підготовки та зменшення впливу людського фактора. Розв'язання цієї проблеми передбачає аналіз існуючих методів компонування, адаптацію алгоритмів компонування до умов DTF-виробництва, формалізацію вхідних і вихідних даних, визначення системи обмежень та розроблення концепції автоматизованої системи компонування макетів для дрібносерійного виробництва текстильних трансферів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема автоматизованого компонування макетів належить до класу задач розкрою та пакування, що досліджуються в межах комбінаторної оптимізації, операційних досліджень і комп'ютерної геометрії. Такі задачі є актуальними для поліграфії, текстильної, швейної, металообробної та інших галузей, де необхідно раціонально розміщувати об'єкти на матеріалі обмеженого розміру з мінімізацією відходів.

Фундаментальну типологію задач розкрою та пакування автори запропонували автори у праці [7]. Для DTF-друку найбільш релевантним є клас задач розміщення двовимірних об'єктів на матеріалі фіксованої ширини та змінної довжини, оскільки рулонна PET-плівка має обмежену ширину, а цифрові трансферні макети виступають об'єктами компонування.

Методи розміщення об'єктів неправильної форми систематизовано у працях [8], де приділили значну увагу геометричному інструменту No-Fit Polygon, що дає змогу визначати допустимі положення об'єктів без їх взаємного перетину. Для DTF-друку цей підхід може бути використаний у випадках, коли необхідно враховувати не лише прямокутну область макета, а й фактичний контур зображення.

Практичні алгоритми двовимірного прямокутного пакування узагальнено у праці [9]. Зокрема, розглянуто shelf-алгоритми, guillotine packing, skyline та maximal rectangles. Ці методи мають прикладне значення для DTF-виробництва, оскільки більшість макетів у виробничих системах може бути подана через прямокутні bounding boxes.

У текстильній і швейній промисловості nesting традиційно застосовується для розміщення лекал на полотні тканини. У праці [10] використали генетичний алгоритм для мінімізації відходів матеріалу. В іншій праці [11] запропоновано гібридний підхід, що поєднує генетичний алгоритм, Bottom-

Left Greedy та No-Fit Polygon [5]. Це підтверджує доцільність комбінування глобального пошуку з локальними евристичними розміщеннями.

Для поліграфічного виробництва близькою є задача gang-run printing. Формалізовано оптимізацію друкарських аркушів як задачу цілочислового лінійного програмування з метою мінімізації виробничих витрат [12]. Цей підхід є важливим для DTF-друку, оскільки також передбачає об'єднання кількох замовлень в одному виробничому циклі.

Сучасний розвиток nesting пов'язаний із його інтеграцією у виробниче планування. Запропоновано концепцію automated scheduled nesting, у якій враховуються не лише втрати матеріалу, а й строки виконання, виробничі пріоритети, переналаштування та собівартість [13]. Для серійного DTF-виробництва такий підхід є особливо актуальним через нерівномірність замовлень, різні розміри макетів і вимоги до терміновості.

Мета статті – формалізація задачі автоматизованого компонування цифрових макетів у технологічному процесі DTF-друку та обґрунтування концепції спеціалізованої системи nesting, спрямованої на мінімізацію втрат рулонної PET-плівки, скорочення часу додрукарської підготовки й зниження впливу людського фактора в умовах виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технологічний потік DTF-друку складається з кількох основних етапів: підготовки цифрового макета, друку зображення на PET-плівці, нанесення термоклейового порошку, його фіксації, сушіння та подальшого термоперенесення на текстильний виріб [1, 2]. На етапі підготовки макета перевіряються розміри зображення, роздільна здатність, колірна модель, наявність прозорих зон, текстових елементів і білої підкладки. Після цього виробничий файл передається до RIP-системи або програмного середовища керування друком [8].

Під час друку на PET-плівці зазвичай формуються кольорові шари СМУК та білий шар, що виконує функцію підкладки й підвищує стабільність відтворення зображення на текстилі [2, 14]. Далі на вологе зображення наноситься термоклейовий порошок, який формує адгезійний шар для подальшого перенесення на тканину. Після запікання клею підготовлений трансфер переноситься на виріб у термопресі за заданих параметрів температури, часу й тиску [14, 15].

У цьому технологічному ланцюгу важливе місце займає етап підготовки та компонування макетів. У серійному DTF-виробництві на одному фрагменті рулонної плівки часто потрібно розмістити значну кількість різнорозмірних макетів, що належать до різних замовлень. Тому ефективність процесу визначається не лише якістю друку чи термоперенесення, але й раціональністю використання площі PET-плівки на етапі додрукарської підготовки.

На практиці компонування макетів часто виконується вручну оператором у графічному редакторі або RIP-середовищі. Такий підхід є простим і гнучким, однак залежить від досвіду виконавця, його уважності та кількості макетів. За

великої кількості дрібних або різноформатних зображень ручне компоновання може призводити до надмірних відступів, нераціонального використання плівки, збільшення часу підготовки та ризику помилок.

З огляду на це доцільним є перехід до автоматизованого компоновання макетів, яке може розглядатися як прикладна задача компоновання (англ. nesting) – раціонального розміщення множини об'єктів на матеріалі обмеженої ширини з мінімізацією відходів [7, 8]. Для DTF-друку матеріалом є рулонна PET-плівка, об'єктами компоновання – цифрові трансферні макети, а основними критеріями ефективності є мінімізація використаної довжини рулону, скорочення часу додрукарської підготовки та зниження впливу людського фактора. Порівняння ручного та автоматизованого компоновання подано в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння ручного та автоматизованого компоновання макетів у DTF-друці

Критерій	Ручне компоновання макетів	Автоматизоване компоновання макетів
Принцип виконання	Оператор самостійно розміщує макети у графічному редакторі або RIP	Розміщення виконується алгоритмом на основі заданих параметрів і обмежень
Використання PET-плівки	Залежить від досвіду оператора; можливі порожні зони та надмірні відступи	Орієнтоване на мінімізацію використаної довжини рулону та зменшення відходів
Час додрукарської підготовки	Зростає зі збільшенням кількості макетів	Може бути скорочений завдяки автоматичному розміщенню
Ризик помилок	Можливі накладання макетів, неправильні зазори, пропуск елементів або помилки орієнтації	Знижується за рахунок перевірки обмежень: неперетину, меж рулону, зазорів і допустимості повороту
Придатність для серійного виробництва	Обмежена при великій кількості різнорозмірних замовлень	Висока за умови адаптації алгоритму до специфіки DTF-друку

Вплив людського фактора	Значний	Зменшений
Потенціал інтеграції у виробництво	Переважно ручна операція	Може бути інтегрований у RIP-систему або окремий програмний модуль

Задача автоматизованого компоунання макетів у DTF-друці може бути розглянута як різновид двовимірного пакування об'єктів на матеріалі фіксованої ширини та змінної довжини. У наукових джерелах для таких задач застосовують евристичні, метоевристичні, геометричні та математичні методи оптимізації [7-9]. Узагальнення основних методів автоматизованого компоунання подано в табл. 2.

Таблиця 2

Існуючі методи та алгоритми автоматизованого компоунання макетів

Метод	Алгоритм	Сутність методу	Доцільність для DTF-друку
Рядкове компоунання	Shelf Algorithms	Макети розміщуються послідовно у горизонтальних рядах – “полицях”. Новий ряд починається тоді, коли в поточному ряду бракує місця	Доцільний для простих замовлень із макетами близької висоти; швидкий, але не завжди забезпечує найкраще використання плівки
Компоунання з прямими розрізами	Guillotine Packing	Матеріал умовно ділиться прямими горизонтальними або вертикальними лініями, а макети розміщуються у сформованих прямокутних областях	Може бути корисним, якщо важлива простота подальшого розрізання плівки; менш ефективний для різнорозмірних макетів
Евристичне розміщення	Bottom-Left	Кожен макет розміщується в найнижчій і найлівішій доступній позиції без перетину з іншими макетами	Доцільний як базовий алгоритм для швидкого компоунання

Контурне заповнення	Skyline Algorithm	Алгоритм підтримує поточний “профіль” зайнятої області та розміщує нові макети на доступних ділянках цього профілю	Перспективний для DTF-друку при роботі з прямокутними bounding boxes; добре підходить для рулонного матеріалу
Аналіз вільних областей	Maximal Rectangles	Після кожного розміщення макета алгоритм зберігає список максимальних вільних прямокутних областей, у які можна вставити наступні макети	Один із найбільш доцільних методів для DTF-друку, оскільки краще використовує вільні проміжки між різнорозмірними макетами
Контурне компонування	No-Fit Polygon	Метод визначає допустимі положення об'єктів складної форми без взаємного перетину їхніх контурів	Доцільний для складних фігурних макетів, якщо потрібно враховувати не лише прямокутну рамку, а реальний контур зображення
Метаевристичний пошук	Генетичний алгоритм	Формує різні варіанти порядку розміщення, орієнтації та групування макетів; кращі рішення відбираються за цільовою функцією	Доцільний для великих наборів макетів, де важливий пошук якісного рішення, але не критичний миттєвий час обчислень
Гібридне компонування	GA + Bottom-Left / GA + Skyline / GA + MaxRects	Поєднує глобальний пошук порядку розміщення з локальним алгоритмом фактичної вставки макетів	Найбільш перспективний підхід для спеціалізованої DTF-системи, оскільки поєднує якість компонування та адаптивність
Виробничо-орієнтоване компонування	Scheduled Nesting	Компонування враховує не лише витрати матеріалу, а й строки виконання та пріоритети	Особливо доцільний для серійного DTF-виробництва з великою кількістю замовлень різної терміновості

Для початкової постановки задачі компоновання доцільно використовувати прямокутну модель макетів, у межах якої найбільш практичними є алгоритми Skyline та Maximal Rectangles, оскільки вони забезпечують прийнятний баланс між якістю розміщення, швидкістю обчислень і простотою програмної реалізації [9]. Shelf-алгоритми можуть застосовуватися для простих випадків із макетами близьких габаритів, однак їхня ефективність знижується за значної різномірності зображень. Для подальшого розвитку системи доцільним є використання No-Fit Polygon з метою врахування реальних контурів макетів [8], а також генетичних і гібридних алгоритмів для покращення якості компоновання у складних виробничих умовах [10, 11].

Задача автоматизованого компоновання макетів у DTF-друці полягає у розміщенні множини цифрових макетів на рулонній PET-плівці фіксованої ширини таким чином, щоб мінімізувати використану довжину рулону за умови дотримання технологічних обмежень.

Нехай задано множину макетів:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \quad (1)$$

де m_i — i -й макет, що характеризується шириною w_i , висотою h_i , площею S_i , допустимістю повороту r_i та технологічними параметрами підготовки.

Рулонна плівка характеризується фіксованою шириною:

$$W = \text{const} \quad (2)$$

та змінною довжиною:

$$L \rightarrow \min \quad (3)$$

Для кожного макета необхідно визначити координати розміщення:

$$(x_i, y_i), \quad (4)$$

а також орієнтацію, якщо поворот дозволений:

$$o_i \in \{0^\circ, 90^\circ\}. \quad (5)$$

Таким чином, для подальшої формалізації задачі доцільно систематизувати параметри, які використовуються під час автоматизованого компоновання макетів. До вхідних даних належать характеристики макетів, параметри рулонної PET-плівки та технологічні обмеження розміщення. Вихідними даними є координати й орієнтація кожного макета, використана довжина рулону та показник ефективності використання матеріалу. Узагальнення вхідних і вихідних даних задачі наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вхідні та вихідні дані задачі автоматизованого компоновання макетів у DTF-друці

Група даних	Позначення	Зміст
Кількість макетів	n	Загальна кількість макетів, які потрібно розмістити

Набір макетів	$M = \{m_1, \dots, m_n\}$	Сукупність цифрових трансферних зображень
Ширина макета	w_i	Горизонтальний розмір і-го макета
Висота макета	h_i	Вертикальний розмір і-го макета
Ширина рулону	W	Фіксована ширина РЕТ-плівки
Технологічний зазор	g	Мінімальна відстань між сусідніми макетами
Дозвіл на поворот	r_i	Ознака, чи можна повертати макет на 90°
Пріоритет замовлення	p_i	Додатковий параметр для групування або терміновості
Координати макета	(x_i, y_i)	Положення макета на рулонній плівці
Орієнтація макета	o_i	Обрана орієнтація макета
Використана довжина рулону	L	Мінімальна довжина плівки, необхідна для розміщення всіх макетів
Коефіцієнт використання матеріалу	η	Частка корисної площі макетів у загальній використаній площі плівки

Цільова функція полягає у мінімізації використаної довжини рулонної плівки:

$$F = L \rightarrow \min \quad (6)$$

Альтернативно задача може бути подана через максимізацію коефіцієнта використання плівки:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i}{W \cdot L} \rightarrow \max, \quad (7)$$

де: $\sum_{i=1}^n w_i h_i$ — сумарна площа всіх макетів, а $W L$ — загальна площа використаної ділянки рулонної плівки.

З урахуванням технологічного зазору фактичні габарити макета можуть бути задані як:

$$w'_i = w_i + 2g, \quad (8)$$

$$h'_i = h_i + 2g, \quad (9)$$

де g – мінімальний технологічний зазор між макетами.

Для забезпечення коректності автоматизованого компонування необхідно задати систему обмежень, яка формалізує технологічно допустимі умови розміщення макетів на рулонній PET-плівці. Ці обмеження визначають межі допустимого розташування кожного макета, унеможливають їх взаємне перекриття, забезпечують дотримання технологічного зазору та враховують допустимість повороту зображень. Таким чином, система обмежень є основою для отримання не лише математично допустимого, але й технологічно придатного варіанта компонування.

Обмеження неперетину макетів. Для будь-яких двох макетів m_i та m_j , де $i \neq j$, має виконуватися умова відсутності перетину. У прямокутній моделі це можна записати одним зі способів:

$$x_i + w'_i \leq x_j, \quad (10)$$

$$x_j + w'_j \leq x_i, \quad (11)$$

$$y_i + h'_i \leq y_j, \quad (12)$$

$$y_j + h'_j \leq y_i. \quad (13)$$

Це означає, що один макет повинен бути повністю лівіше, правіше, вище або нижче іншого.

Обмеження ширини рулону. Кожен макет має бути розміщений у межах фіксованої ширини рулонної плівки:

$$0 \leq x_i, \quad (14)$$

$$x_i + w'_i \leq W. \quad (15)$$

Обмеження довжини рулону. Використана довжина рулону повинна покривати всі розміщені макети:

$$L \geq y_i + h'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

Оскільки довжина рулону змінна, саме параметр L є основним критерієм мінімізації.

Обмеження технологічного зазору. Між сусідніми макетами має бути забезпечений мінімальний технологічний зазор:

$$d(m_i, m_j) \geq g, \quad (17)$$

де $d(m_i, m_j)$ – мінімальна відстань між межами двох макетів.

Обмеження повороту макетів. Для кожного макета задається параметр допустимості повороту:

$$r_i \in \{0, 1\}. \quad (18)$$

Якщо: $r_i = 1$, то макет може бути повернутий на 90° : $o_i \in \{0^\circ, 90^\circ\}$.

Якщо: $r_i = 0$, то поворот заборонений: $o_i = 0^\circ$.

Це обмеження є важливим для DTF-друку, оскільки окремі зображення мають фіксовану орієнтацію через напрям написів, логотипів, градієнтів, декоративних елементів або вимоги подальшого термоперенесення.

Пропонується концепція автоматизованої системи, що передбачає перехід від ручного розміщення макетів до алгоритмічного формування виробничого файлу, що представлено на рис. 1.

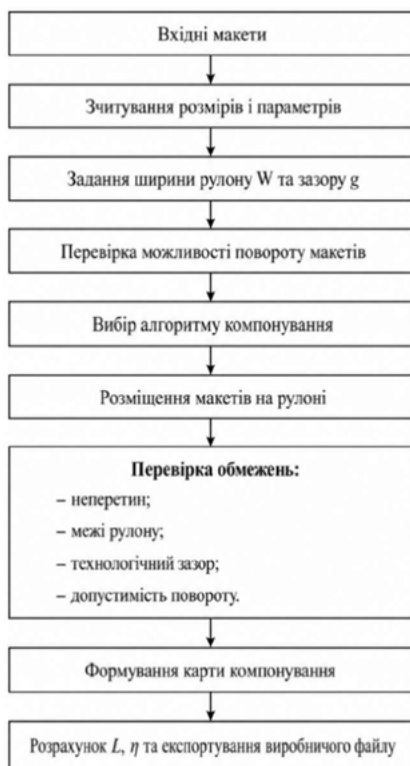


Рис.1 Концептуальна схема автоматизованої системи компоновки макетів

Система повинна отримувати на вході набір макетів, їхні розміри, ширину рулону, технологічний зазор, параметри допустимого повороту та пріоритети замовлень. На виході система формує оптимізовану карту розміщення макетів із координатами кожного елемента, обраною орієнтацією та розрахованим коефіцієнтом використання матеріалу.

Висновки. Таким чином, автоматизоване компонування макетів у DTF-друці доцільно розглядати як задачу двовимірного розміщення об'єктів на рулонному матеріалі фіксованої ширини та змінної довжини. На відміну від ручного макетування, алгоритмічний підхід дає можливість формалізувати вхідні дані, обмеження та критерії оптимізації. Основним критерієм є мінімізація використаної довжини PET-плівки або максимізація коефіцієнта її використання.

Запропонована математична постановка забезпечує основу для подальшого розроблення програмного модуля автоматизованого компонування для

зменшення матеріальних втрат, скорочення часу додрукарської підготовки та зниження ризику помилок оператора.

Список використаних джерел

1. Ujiie H. Digital Printing of Textiles. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; CRC Press, 2006. – 378 с.
2. Петрів Ю. І. Інтелектуальна система контролю якості DTF-друку в режимі реального часу з використанням комп'ютерного зору // Поліграфія та упаковка майбутнього: матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «NextGen Print & Packaging» (Львів, 21–23 травня 2025 р.). – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. – URL: <https://science.lpnu.ua/nextgen-print-packaging/conference-proceedings>.
3. Direct To Film Printing Market (2025 – 2030). Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/direct-film-printing-market-report> [Accessed 03 April 2026]
4. Петрів Ю. І. Модель факторів якості комплектування малооб'ємних книжкових блоків у вкладально-швейно-різальних агрегатах // Наукові записки : наук.-техн. збірник. – Львів : УАД, 2013. – Вип. 3 (44). – С. 88–95.
5. Repeta V., Petriv Y., Kukura Y. Optimization and forecasting models of the sublimation printing process on textile materials. *Journal of Print and Media Technology Research*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 189–197.
6. Durnyak B., Shepita P., Tupyshak L., Petriv Y., Shepita J. Post-press product quality assessment models for the IIoT system. ICyberPhyS-2024: 1st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (June 28, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine). ceur-ws.org, 2024.
7. Wäscher G., Haußner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 179, No. 3. P. 1109–1130.
8. Bennell J. A., Oliveira J. F. A tutorial in irregular shape nesting problems. *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 195, No. 3. P. 622–638.
9. Jylänki J. *A Thousand Ways to Pack the Bin: A Practical Approach to Two-Dimensional Rectangle Bin Packing Algorithms*. 2010.
10. Arthaya B., Yogasara T., Soesilowati. Genetic Algorithm Implementation for Solving Nesting Problem in Garment Industry. *Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*. Bangkok, 2006

11. Amaro Júnior B., Pinheiro P. R., Saraiva R. D., Pinheiro P. C. A Hybrid Approach for the Nesting Problem: Case Study on a Textile Industry. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. 2013.
12. Fullmer D., Warnick S. Press Sheet Optimization for Open Loop Control of Industrial Scale Gang-Run Printing. *American Control Conference*. Washington, 2013. P. 3517–3522.
13. Berg S. V., Nielsen M. B., Bodilsen M. S., Schou C., Sarivan I.-M. Automated Scheduled Nesting for Flexible Manufacturing. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 1415–1420.
14. Шепіта П. І., Петрів Ю. І. Математична модель і метод оптимізації режимів вентиляторів шейкера для зменшення латерального зміщення плівки у DTF-друкарській системі. *Наукові записки / Scientific Papers*. 2025. № 2 (71).
15. Prybeha D., Koshevko J., Smutko S. et al. Technology of Making Thermal Transfers // *Fibres and Textiles*. 2021. Vol. 28, No. 4. P. 83–88.

References

1. Ujiie H. *Digital Printing of Textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; CRC Press, 2006. 378 p.
2. Petriv Yu. I. Intelligent real-time quality control system for DTF printing using computer vision. *Printing and Packaging of the Future: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "NextGen Print & Packaging"* (Lviv, May 21–23, 2025). Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2025. Available from: <https://science.lpnu.ua/nextgen-print-packaging/conference-proceedings>.
3. *Direct To Film Printing Market (2025–2030)*. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/direct-film-printing-market-report> [Accessed 03 April 2026].
4. Petriv Yu. I. Model of quality factors for assembling short-run book blocks in gathering-stitching-trimming machines. *Scientific Papers: Scientific and Technical Collection*. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 2013. Issue 3 (44). P. 88–95.
5. Repeta V., Petriv Y., Kukura Y. Optimization and forecasting models of the sublimation printing process on textile materials. *Journal of Print and Media Technology Research*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 189–197.
6. Durnyak B., Shepita P., Tupychak L., Petriv Y., Shepita J. Post-press product quality assessment models for the IIoT system. *ICyberPhyS-2024: 1st*

- International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems* (June 28, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine). CEUR-WS.org, 2024.
7. Wäscher G., Haußner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 179, No. 3. P. 1109–1130.
 8. Bennell J. A., Oliveira J. F. A tutorial in irregular shape nesting problems. *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 195, No. 3. P. 622–638.
 9. Jylänki J. *A Thousand Ways to Pack the Bin: A Practical Approach to Two-Dimensional Rectangle Bin Packing Algorithms*. 2010.
 10. Arthaya B., Yogasara T., Soesilowati. Genetic algorithm implementation for solving nesting problem in garment industry. *Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*. Bangkok, 2006.
 11. Amaro Júnior B., Pinheiro P. R., Saraiva R. D., Pinheiro P. C. A hybrid approach for the nesting problem: case study on a textile industry. *Brazilian Symposium on Operations Research*. 2013.
 12. Fullmer D., Warnick S. Press sheet optimization for open loop control of industrial scale gang-run printing. *American Control Conference*. Washington, 2013. P. 3517–3522.
 13. Berg S. V., Nielsen M. B., Bodilsen M. S., Schou C., Sarivan I.-M. Automated scheduled nesting for flexible manufacturing. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 1415–1420.
 14. Shepita P. I., Petriv Yu. I. Mathematical model and method for optimizing shaker fan modes to reduce lateral film displacement in a DTF printing system. *Scientific Papers*. 2025. No. 2 (71).
 15. Prybeha D., Koshevko J., Smutko S. et al. Technology of making thermal transfers. *Fibres and Textiles*. 2021. Vol. 28, No. 4. P. 83–88.

DOI 10.32403/2411-9210-2026-1-55-124-138

IMPROVING DTF PRINTING EFFICIENCY THROUGH AUTOMATED DESIGN LAYOUT OPTIMIZATION

YU. I. Petriv¹, P. I. Shepita²

1. Lviv Polytechnic National University, Stepan Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-0547-9801>, e-mail: yurii.i.petriv@lpnu.ua
2. Lviv Polytechnic National University, Stepan Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-8134-8014>, e-mail: petro.i.shepita@lpnu.ua

The article addresses the problem of improving the efficiency of the Direct-to-Film (DTF) printing process through the automated layout of designs on roll-fed PET film. It is substantiated that the efficiency of DTF production is determined not only by print quality, colour reproduction stability, and heat-transfer parameters, but also by the rational use of material at the prepress stage. It is shown that manual layout preparation in a graphic editor or RIP environment depends significantly on the operator's experience, requires additional time, and may lead to inefficient film usage, excessive empty areas, incorrect spacing, overlapping elements, or improper image orientation.

The layout of designs in DTF printing is considered as an applied problem of two-dimensional object placement on roll material with a fixed width and variable length. The article analyses the possibility of applying nesting algorithms, including shelf algorithms, guillotine packing, skyline, maximal rectangles, genetic algorithms, and scheduled nesting approaches. The main input parameters of the problem are formalized, including design dimensions, roll width, technological spacing, rotation allowance, and production priorities. The output of the system is an optimized layout map with the coordinates of each design, its selected orientation, and the calculated material utilization coefficient.

The proposed approach forms a basis for the further development of a software module for automated design layout in DTF printing. Such a module will make it possible to reduce material losses, shorten prepress preparation time, and improve the stability of the production process.

Keywords. *DTF printing; automated layout; nesting; PET film; prepress preparation; design placement optimization; two-dimensional packing; bin packing; technological spacing; material utilization coefficient; roll material.*

Стаття надійшла до редакції 18.04.2026.

Received 18.04.2026