

ФОРМАЛІЗОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФЛЕКСОГРАФІЧНОГО ДРУКУ ГНУЧКИХ ПАКОВАНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В. Г. Слободяник¹, М. В. Ципленков²

1. Національний Університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0000-0001-6982-7194> e-mail: valentyana.h.slobodianyuk@lpnu.ua

2. Національний Університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0009-0004-8973-6950> e-mail: mark.tsyplenkov.mnrm.2025@lpnu.ua

У статті розглянуто технологічний процес флексографічного друку гнучких пакувань з позицій його формалізованого подання та аналітичного дослідження структури функціональних взаємозв'язків між основними елементами процесу. Актуальність роботи зумовлена необхідністю переходу від традиційного лінійного опису технологічних операцій до системного аналізу процесів друку, зокрема у сфері виготовлення гнучких пакувань з підвищеними вимогами до якості та безпечності. Метою дослідження є формалізоване моделювання технологічного процесу флексографічного друку з використанням апарату теорії графів. У результаті аналізу графової моделі встановлено, що процес перенесення фарби є центральною ланкою технологічного процесу та акумулює вплив властивостей матеріалів, фарбових систем і параметрів допоміжних елементів флексографічного друку. Показано нелінійний характер технологічного процесу, зумовлений наявністю зворотних функціональних зв'язків між окремими етапами. Запропонована модель має узагальнений характер. Може бути використана для аналітичного та порівняльного дослідження способів друку гнучких пакувань.

Ключові слова: флексографічний друк, гнучке пакування, технологічний процес, графове моделювання, орієнтований граф, перенесення фарби, сушіння фарбового шару.

Постановка проблеми. Гнучке пакування для харчової продукції є одним із ключових елементів сучасного ринку споживчих товарів, оскільки виконує одночасно захисну, інформаційну та комунікаційну функції. Для харчових виробів пакування відіграє особливо важливу роль, забезпечуючи збереження фізико-хімічних властивостей продукту, подовження терміну його реалізації та відповідність санітарно-гігієнічним вимогам. У зв'язку з цим до технологій виготовлення пакування, зокрема до процесів друку, висувуються підвищені вимоги щодо якості, стабільності та безпечності. Виконання цих вимог значною мірою залежить не лише від окремих технологічних операцій, а й від структури та взаємодії елементів друкарського процесу в цілому.

Актуальною проблемою залишається відсутність формалізованих моделей, які дозволяли б аналітично дослідити технологічний процес друку гнучких харчових паковань без прив'язки до конкретного обладнання або виробничих умов. У більшості випадків технологічний процес подається як лінійна послідовність операцій, що ускладнює виявлення ключових елементів процесу та обґрунтування їх впливу на якість готової продукції [1]. З огляду на зростання вимог до безпечності харчових паковань, зменшення міграції компонентів фарбових систем та підвищення стабільності друкарського процесу, виникає потреба у застосуванні аналітичних методів дослідження технологічних процесів друку. Особливої актуальності набувають методи, що дозволяють досліджувати не окремі операції, а сукупність їх функціональних взаємозв'язків у межах єдиного технологічного процесу. Одним із таких методів є графове моделювання, яке дає змогу подати технологічний процес у вигляді системи взаємопов'язаних елементів та виконати аналітичний аналіз характеру їх взаємодії [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних наукових дослідженнях флексографічний друк розглядається як один із найбільш адаптивних способів виготовлення гнучких паковань для харчової продукції, що зумовлено його технологічною гнучкістю та можливістю використання фарбових систем з пониженим вмістом летких органічних сполук. У роботі [3] проаналізовано основні фактори, що впливають на якість флексографічного друку, зокрема властивості задруковуваних матеріалів, характеристики фарб та режими сушіння, що підтверджує багатofакторний характер технологічного процесу.

Питання безпечності пакувальних матеріалів для харчових продуктів широко висвітлюється в публікаціях, присвячених міграції компонентів друкарських фарб. У дослідженнях [3, 4] показано, що склад фарбової системи та умови її закріплення істотно впливають на рівень міграції низькомолекулярних сполук у харчові продукти або модельні середовища. Це зумовлює необхідність врахування фарбової системи як одного з ключових елементів технологічної моделі друкарського процесу.

Порівняльні аспекти флексографічного та глибокого способів друку розглядаються у дослідженнях, присвячених друку на полімерних плівках. У роботі [5] проаналізовано друк на поліетиленових і поліпропіленових плівках методом глибокого друку та показано роль змочування поверхні і властивостей фарбових систем у формуванні якості відбитків. Автори відзначають, що зміна параметрів процесу істотно впливає на показники друку.

У дослідженні [6] розглянуто механізм перенесення фарби при ротогравюрному друці та встановлено його високу чутливість до умов друкарського контакту. Показано, що незначні зміни технологічних режимів можуть призводити до нестабільності процесу та дефектоутворення. Отримані результати підтверджують складність адаптації глибокого друку до змін виробничих умов і високі вимоги до стабільності технологічного процесу.

Більшість наявних досліджень зосереджена на експериментальному або описовому аналізі окремих параметрів технологічного процесу друку. Формалізовані підходи до подання технологічного процесу виготовлення гнучких паковань як системи взаємопов'язаних елементів застосовуються обмежено. Водночас у сучас-

них дослідженнях[2], показано, що використання структурних і мережевих моделей є ефективним інструментом аналізу складних виробничих процесів, оскільки дозволяє виявляти взаємозв'язки між елементами системи та оцінювати характер їх взаємодії. Це створює методологічне підґрунтя для застосування графового моделювання у поліграфічних технологіях.

Мета статті. Метою дослідження є розроблення формалізованої моделі технологічного процесу флексографічного друку гнучких паковань для харчової продукції та її використання для аналітичного порівняння флексографічного і глибокого способів друку.

Виклад основного матеріалу. Технологічний процес флексографічного друку гнучких паковань для харчової продукції характеризується багатofакторністю та наявністю складних взаємозв'язків між окремими елементами процесу виготовлення друкованого пакування. На відміну від лінійного опису технологічних операцій, який традиційно застосовується в нормативно-технічній документації, аналітичне дослідження потребує формалізованого подання структури процесу з урахуванням функціональної ролі його основних складових.

З метою формалізації технологічного процесу флексографічного друку у даному дослідженні використано підхід графового моделювання.

Технологічний процес подано у вигляді орієнтованого графа:

$$G = (V, E),$$

де V – множина вершин, що відповідають основним елементам процесу, а E – множина орієнтованих ребер, які відображають функціональні зв'язки між ними.

Структурну модель технологічного процесу флексографічного друку у вигляді орієнтованого графа наведено на рис. 1.

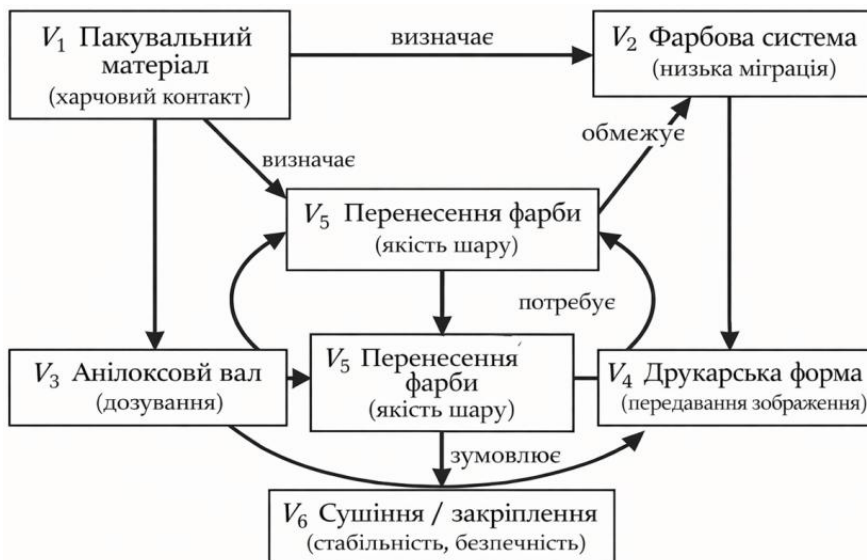


Рис. 1. Орієнтований граф взаємозв'язків основних елементів технологічного процесу флексографічного друку гнучких паковань для харчової продукції.

До множини вершин орієнтованого графа включено основні елементи технологічного процесу флексографічного друку гнучких пакувань для харчової продукції, а саме: пакувальний матеріал, призначений для контакту з харчовими продуктами; фарбову систему з пониженим рівнем міграції компонентів; анілоксовий вал як елемент дозування фарби; друкарську форму, що забезпечує передавання зображення; процес перенесення фарби на пакувальний матеріал; а також процес сушіння та закріплення фарбового шару. Такий склад вершин дозволяє відобразити не лише послідовність технологічних операцій, а й функціональні взаємозв'язки між ключовими елементами процесу.

Орієнтовані ребра графа відображають причинно-наслідкові зв'язки між елементами технологічного процесу. Властивості пакувального матеріалу та характеристики фарбової системи визначають умови формування фарбового шару, тоді як анілоксовий вал і друкарська форма забезпечують дозування фарби та передавання зображення. Центральною ланкою моделі є процес перенесення фарби, який акумулює вплив усіх попередніх елементів і безпосередньо визначає якість друкованого шару.

Подальший перехід до етапу сушіння та закріплення фарбового шару зумовлений необхідністю забезпечення стабільності фарбового покриття та зниження ризиків міграції компонентів фарбової системи, що є критично важливим для харчових пакувань. Особливістю запропонованої графової моделі є наявність зворотного орієнтованого зв'язку між процесами сушіння та перенесення фарби, який відображає їх взаємозалежність. Зміна режимів сушіння впливає на стабільність процесу перенесення фарби, адгезію фарбового шару та його експлуатаційні властивості, що свідчить про нелінійний характер технологічного процесу.

Аналіз структури орієнтованого графа показує, що процес перенесення фарби є центральною ланкою технологічного процесу, оскільки саме на цьому етапі формується більшість параметрів, що визначають якість друкованого пакування, зокрема рівномірність покриття, адгезія та стабільність фарбового шару. Наявність зворотного зв'язку з етапом сушіння підкреслює необхідність узгодженого вибору технологічних режимів для забезпечення безпечності та якості харчового пакування.

Запропонована графова модель має узагальнений характер і відображає ключові функціональні зв'язки технологічного процесу без деталізації окремих операцій, що забезпечує її придатність для аналітичного та порівняльного дослідження способів друку. Такий підхід створює методологічне підґрунтя для порівняльного аналізу флексографічного та глибокого способів друку та обґрунтування доцільності застосування флексографії для виготовлення гнучких пакувань харчової продукції.

Висновок. У роботі запропоновано формалізоване подання технологічного процесу флексографічного друку гнучких пакувань для харчової продукції у вигляді орієнтованого графа, що дозволяє перейти від лінійного опису технологічних операцій до аналізу системи функціональних взаємозв'язків між основними елементами процесу. Сформована графова модель відображає ключові технологічні ланки, зокрема пакувальний матеріал, фарбову систему, елементи дозування

та передавання фарби, процес перенесення фарбового шару, а також етапи його сушіння та закріплення.

У результаті аналізу структури орієнтованого графа встановлено, що процес перенесення фарби є центральною ланкою технологічного процесу, оскільки акумулює вплив властивостей пакувального матеріалу, характеристик фарбової системи та параметрів допоміжних елементів флексографічного друку. Показано, що наявність зворотного зв'язку між процесами перенесення фарби та сушіння фарбового шару зумовлює нелінійний характер технологічного процесу та визначає необхідність узгодженого вибору технологічних режимів.

Запропонована графова модель має узагальнений характер і придатна для аналітичного та порівняльного дослідження способів друку гнучких пакувань. Використання даного підходу створює методологічне підґрунтя для обґрунтування доцільності застосування флексографічного друку у порівнянні з глибоким друком при виготовленні харчових пакувань з урахуванням вимог до якості та безпечності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Choi S. H., Yang B., Cheung H. H., Yang Y. X. RFID tag data processing in manufacturing for track-and-trace anti-counterfeiting. *Computers in Industry*. 2015. Vol. 68. P. 148–161. DOI: 10.1016/j.compind.2015.01.004 (дата звернення: 11.01.2026).
2. Ding C., Qiao F., Liu J., Wang D. Knowledge graph modeling method for product manufacturing process based on human–cyber–physical fusion. *Advanced Engineering Informatics*. 2023. Vol. 58. Article 102183. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102183 (дата звернення: 12.01.2026).
3. Żolek-Tryznowska Z., Rombel M., Petriaszwili G., Dedijer S., Kašiković N. Influence of some flexographic printing process conditions on the optical density and tonal value increase of overprinted plastic films. *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 9. Article 816. DOI: 10.3390/coatings10090816 (дата звернення: 12.01.2026).
4. Blanco-Zubiaguirre L., Zabaleta I., Prieto A., Olivares M., Zuloaga O., Elizalde M. P. Migration of photoinitiators, phthalates and plasticizers from paper and cardboard materials into different simulants and foodstuffs. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 344. Article 128597. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128597 (дата звернення: 18.01.2026).
5. Ozcan A., Zulfıgaroglu R. An investigation on printability of different solvent based inks by gravure printing onto various substrates. *Journal of Graphic Engineering and Design*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 31–36. DOI: 10.24867/JGED-2020-2-03132 (дата звернення: 18.01.2026).
6. Brumm P., Weber T. E., Sauer H. M., Dörsam E. Ink splitting in gravure printing: localization of the transition from dots to fingers. *Journal of Print and Media Technology Research*. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 81–93. DOI: 10.14622/JPMTR-2016 (дата звернення: 20.01.2026).

REFERENCES

1. Choi, S. H., Yang, B., Cheung, H. H., & Yang, Y. X. (2015). RFID tag data processing in manufacturing for track-and-trace anti-counterfeiting. *Computers in Industry*, 68, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.01.004> (in English).
2. Ding, C., Qiao, F., Liu, J., & Wang, D. (2023). Knowledge graph modeling method for product manufacturing process based on human–cyber–physical fusion. *Advanced Engineering Informatics*, 58, Article 102183. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102183> (in English).
3. Żolek-Tryznowska, Z., Rombel, M., Petriaszwili, G., Dedijer, S., & Kašiković, N. (2020). Influence of some flexographic printing process conditions on the optical density and tonal

value increase of overprinted plastic films. *Coatings*, 10(9), Article 816. <https://doi.org/10.3390/coatings10090816> (in English).

4. Blanco-Zubiaguirre, L., Zabaleta, I., Prieto, A., Olivares, M., Zuloaga, O., & Elizalde, M. P. (2021). Migration of photoinitiators, phthalates and plasticizers from paper and cardboard materials into different simulants and foodstuffs. *Food Chemistry*, 344, Article 128597. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128597> (in English).

5. Ozcan, A., & Zulfigaroglu, R. (2020). An investigation on printability of different solvent based inks by gravure printing onto various substrates. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 11(2), 31–36. <https://doi.org/10.24867/JGED-2020-2-03132> (in English).

6. Brumm, P., Weber, T. E., Sauer, H. M., & Dörsam, E. (2021). Ink splitting in gravure printing: Localization of the transition from dots to fingers. *Journal of Print and Media Technology Research*, 10(2), 81–93. <https://doi.org/10.14622/JPMTR-2016> (in English).

doi: 10.32403/0554-4866-2026-1-91-53-59

FORMALIZED MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF FLEXOGRAPHIC PRINTING OF FLEXIBLE PACKAGING FOR SPECIAL PURPOSES

V. G. Slobodianyuk¹, M. V. Tsiplenkov²

1. Lviv Polytechnic National University, 12 Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6982-7194> e-mail: valentyna.h.slobodianyuk@lpnu.ua

2. Lviv Polytechnic National University, 12 Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-8973-6950> e-mail: mark.tsiplenkov.mnrm.2025@lpnu.ua

The article focuses on the analysis of the technological process of flexographic printing of flexible packaging from the standpoint of its formalized representation and structural analysis. The relevance of the study is determined by the need to move beyond the traditional linear description of technological operations toward a systemic approach that allows the identification of functional relationships between the key elements of the printing process. Such an approach is particularly important for flexible packaging production, where increasing requirements for print quality and process stability require a deeper understanding of technological interactions.

The aim of the research is to develop a formalized model of the flexographic printing process using graph theory tools and to assess its applicability for analytical studies. The methodological basis of the research is the construction of a directed graph in which the vertices correspond to the main elements of the technological process, including packaging material, ink system, anilox roller, printing plate, ink transfer process, and drying and curing stages. Directed edges represent cause-and-effect relationships between these elements.

The analysis of the graph structure shows that the ink transfer process is the central element of the technological system, as it accumulates the influence of material properties, ink characteristics, and auxiliary printing components. The presence of feedback between the ink transfer and drying stages indicates the nonlinear nature of

the flexographic printing process. Changes in drying conditions affect ink adhesion and layer stability, which in turn influence ink transfer parameters and overall print quality.

The proposed graph-based model has a generalized character and is suitable for qualitative analytical studies of printing technologies. It can be used as a methodological tool for the structural analysis and comparison of printing processes in flexible packaging production, including flexographic and gravure printing.

Keywords: *flexographic printing; flexible packaging; technological process; graph modeling; directed graph; ink transfer; drying.*



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0

© В. Г. Слободяник, М. В. Циленков

Стаття надійшла до редакції 02.05.2026

Received 02.05.2026

Стаття прийнята 21.05.2026

Accepted 21.05.2026

Опубліковано 30.05.2026

Published 30.05.2026