

УДК 655.3.026

© О. О. Сарапулова, аспірантка, В. П. Шерстюк, д.х.н.,  
професор, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУВАННЯ ПОКРИТТІВ  
З НАНОФОТОННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ  
НА ЇХНІ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**У статті розроблено комплексну модель на основі досліджень впливу технологічних параметрів друкування на процес виготовлення друкованих нанофотонних елементів новітніх пакувань і на їхні фотолюмінесцентні характеристики. Створена комплексна модель дозволяє визначати фотолюмінесцентні характеристики друкованих покриттів з нанофотонними елементами шляхом врахування технологічних параметрів, а також створювати друковані нанофотонні елементи з наперед заданими фотолюмінесцентними характеристиками.**

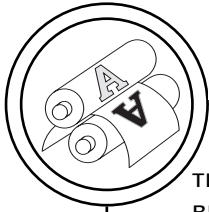
**Ключові слова:** комплексна модель; нанофотонні елементи; друкування; новітні пакування; фотолюмінесценція.

**Постановка проблеми**

Новітні пакування, тобто активні і розумні пакування, все більш широко використовуються для інформування споживачів про придатність запакованого продукту до споживання шляхом зміни властивостей функціональних елементів, розміщених на їхній поверхні [1]. Перспективними є нанофотонні друковані елементи новітніх пакувань, які містять нанорозмірні фотоактивні компоненти у складі друкарських композицій, нанесених на внутрішню (для спостереження за внутрішнім станом запакованих харчових продуктів) або зовнішню (для спостереження за дотриманням необхідних умов зберігання харчових продуктів) поверхню пако-

вання. Нанофотонні елементи новітніх пакувань можуть змінювати у тому числі свої люмінесцентні властивості (колір, інтенсивність люмінесценції) залежно від того, з якими речовинами вони контактують, повідомляючи таким чином про процеси, які відбуваються всередині пакування, підвищуючи безпечність споживання продукту і практично унеможливаючи харчові отруєння, оскільки дають можливість уникнути використання продуктів, які є непридатними до вживання внаслідок закінчення терміну споживання або зберігання при неналежних умовах.

Поліграфічне виготовлення новітніх пакувань з нанофотонними елементами ускладнене



тим, що для забезпечення вихідних фотолюмінесцентних властивостей таких елементів і коректного їх функціонування у подальшому необхідно дотримуватися певних технологічних режимів. За допомогою зміни технологічних параметрів можна як покращити, так і погіршити показники фотолюмінесценції друкованих нанофотонних елементів. Крім того, за відомими технологічними параметрами можна передбачити кількісні значення показників фотолюмінесценції покриттів з нанофотонними елементами, а також підібрати значення технологічних параметрів для одержання покриттів з наперед заданими фотолюмінесцентними характеристиками.

#### **Аналіз попередніх досліджень**

Аналіз літературних джерел показав, що питання врахування впливу технологічних параметрів друкарського процесу виготовлення нанофотонних елементів новітніх пакувань на їхні фотолюмінесцентні характеристики є недостатньо висвітленими в літературі. Досить широко представлені дослідження складу нанофотонних композицій [2–4], також розглянуто проблеми виготовлення нанофотонних елементів трафаретним [5, 6], тампонним друком [7]. Таким чином, необхідними є узагальнення досліджень впливу технологічних параметрів друкування на фотолюмінесцентні характеристики друкованих нанофотонних елементів новітніх пакувань з метою виготовлення активних і розумних

пакувань з наперед заданими властивостями функціональних елементів.

#### **Мета роботи**

Метою роботи є створення математичної моделі, яка враховує вплив параметрів технологічного процесу друкування покриттів з нанофотонними елементами для новітніх пакувань на фотолюмінесцентні характеристики одержуваних покриттів.

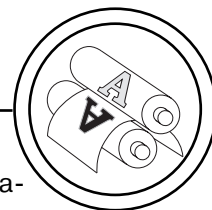
#### **Результати проведених досліджень**

На підставі аналітичних залежностей, отриманих із аналітичних і експериментальних досліджень, наведених у [2–7], було створено комплексну модель, яка враховує вплив технологічних параметрів нанесення нанофотонних покриттів на основі нано-ZnO і полівінілпіролідону на їхні фотолюмінесцентні властивості. Модель дозволяє спрогнозувати показники фотолюмінесценції друкованих нанофотонних елементів (колір, інтенсивність) за відомими технологічними параметрами, а також підібрати технологічні параметри для отримання друкованих нанофотонних елементів із заданими показниками фотолюмінесценції (колір, інтенсивність).

У загальному вигляді інтенсивність люмінесценції  $I$  нанофотонного елемента, надрукованого на новітньому пакуванні, визначається:

$$I = k_{\text{НФ}} k_{\text{ЗМ}} k_{\text{суш}} I_{\text{НФ}}, \quad (1)$$

де  $k_{\text{НФ}}$  — коефіцієнт, який враховує композиційний склад



нанофотонної фарби (НФ),  $k_{ЗМ}$  — коефіцієнт, який враховує параметри задрукуваного матеріалу (ЗМ),  $k_{суш}$  — коефіцієнт, який враховує вплив параметрів фіксування шару НФ,  $I_{НФ}$  — інтенсивність люмінесценції нанофотонної композиції (НФ) з урахуванням технологічних параметрів:

$$I_{НФ} = f(R, \delta), \quad (2)$$

де  $R$  — відсоток градацій растрової ділянки,  $\delta$  — товщина шару НФ.

Інтенсивність люмінесценції  $I$  нанофотонного елемента, який знаходиться на зовнішній поверхні задрукуваного матеріалу:

$$I = k_{НФ} ((1 - R/100) I_{ЗМ} + R/100 (I_{НФ} + I_{ЗМ} \cdot k_{гасіння})) k_{суш}, \quad (3)$$

де  $R$  — відсоток градацій растрової ділянки,  $I_{ЗМ}$  — інтенсивність люмінесценції задрукуваного матеріалу (ЗМ),  $I_{НФ}$  — інтенсивність люмінесценції нанофотонної композиції (НФ),  $k_{гасіння}$  — коефіцієнт гасіння люмінесценції ЗМ, вкритого шаром НФ,  $k_{суш}$  — коефіцієнт, який враховує вплив параметрів фіксування шару НФ.

Коефіцієнт  $k_{НФ}$  враховує композиційний склад нанофотонної фарби:

$$k_{НФ} = k_c \cdot k_M, \quad (4)$$

де  $k_c$  — коефіцієнт, який враховує концентрацію люмінесцентної складової;  $k_M$  — коефіцієнт, який враховує молекулярну масу ПВП.

На основі експериментальних досліджень було одержано

аналітичний вираз для визначення  $k_{гасіння}$ :

$$k_{гасіння} = -0,00003 \delta^2 + 0,0002 \delta + 1, \quad (5)$$

де  $\delta$  — товщина шару нанофотонної фарби.

Отримані на підставі експериментальних досліджень, наведених у [2–7], аналітичні залежності, що дозволяють визначити при виготовленні нанофотонного шару певної товщини  $\delta$  прогнозовану інтенсивність люмінесценції нанофотонного шару  $I_{НФ}$  400 піку при  $\lambda = 400$  нм без урахування люмінесценції задрукуваного матеріалу:

$$I_{НФ 400} = 0,0032\delta + 0,3003, \quad (6)$$

інтенсивність люмінесценції  $I_{НФ 525}$  піку при  $\lambda = 525$  нм:

$$I_{НФ 525} = 0,00008\delta^2 - 0,00003\delta + 0,3259, \quad (7)$$

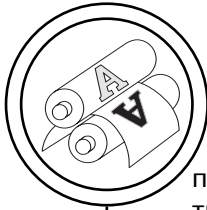
а також інтегральну інтенсивність люмінесценції  $I_{НФ}$ :

$$I_{НФ} = 0,00005\delta^2 + 0,0015\delta + 0,3055. \quad (8)$$

Із урахуванням залежностей (4), (5) і (8), вираз (3) набуває вигляду:

$$I = k_c \cdot k_M \cdot k_{суш} ((1 - R/100) I_{ЗМ} + R/100 (0,00005\delta^2 + 0,0015\delta + 0,3055 + I_{ЗМ} (-0,00003 \delta^2 + 0,0002 \delta + 1))). \quad (9)$$

Для визначення кольору люмінесценції необхідно визначити інтенсивності люмінесценції окремо на короткохвильовій ( $\lambda = 400$  нм) і середньохвильовій ( $\lambda = 500$  нм) ділянках спектру для випадку використання розробленої нанофотонної фарби на основі нано-ZnO і



полівінілпіролідону та розглянути їхнє співвідношення.

Таким чином, із урахуванням залежностей (4), (5) і (6), інтенсивність люмінесценції нанофотонного елемента у зоні  $\lambda = 400$  нм  $I_{400}$  складає:

$$I_{400} = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} \left( (1 - R/100) I_{3M\ 400} + R/100 (0,0032\delta + 0,3003 + I_{3M\ 400} \times (-0,00003\delta^2 + 0,0002\delta + 1)) \right), \quad (10)$$

де  $I_{3M\ 400}$  — інтенсивність люмінесценції 3М у зоні  $\lambda = 400$  нм.

Відповідно, з урахуванням залежностей (4.4), (4.5) і (4.7), інтенсивність люмінесценції нанофотонного елемента у зоні  $\lambda = 525$  нм  $I_{525}$  складає:

$$I_{525} = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} \left( (1 - R/100) I_{3M\ 525} + R/100 (0,0032\delta + 0,3003 + I_{3M\ 525} \times (-0,00003\delta^2 + 0,0002\delta + 1)) \right), \quad (11)$$

де  $I_{3M\ 525}$  — інтенсивність люмінесценції 3М у зоні  $\lambda = 400$  нм.

Інтенсивність люмінесценції І нанофотонного елемента, який знаходиться на внутрішній поверхні задрукованого матеріалу:

$$I = k_{\text{НФ}} (I_{3M} + R/100 (I_{3M} + I_{\text{НФ}} \cdot k_{\text{плівки}})) k_{\text{суш}}. \quad (12)$$

На підставі експериментальних досліджень, наведених у [2–7], одержано аналітичні вирази визначення  $k_{\text{плівки}}$  для матової поліпропіленової плівки:

$$k_{\text{плівки}} = -0,00001\delta^2 + 0,0057\delta + 0,2282; \quad (13)$$

і для глянцевої поліпропіленової плівки:

$$k_{\text{плівки}} = -0,000009\delta^2 + 0,0059\delta + 0,0644; \quad (14)$$

де  $\delta$  — товщина шару нанофотонної фарби.

Із урахуванням залежностей (3), (5) і (13), для матової поліпропіленової плівки вираз (12) набуває вигляду:

$$I = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} + R/100 (I_{3M} + (0,00005\delta^2 + 0,0015\delta + 0,3055) \cdot (-0,00001\delta^2 + 0,0057\delta + 0,2282))) = \quad (15)$$

$$= k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} (1 + R/100) + R/100 (-5 \cdot 10^{-10} \delta^4 + 2,7 \cdot 10^{-10} \delta^3 + 1,7 \cdot 10^{-5} \delta^2 + 0,0021\delta + 0,0697)).$$

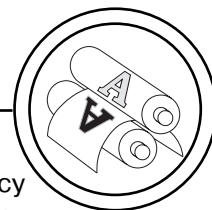
Знехтувавши значеннями  $-5 \cdot 10^{-10} \delta^4$  і  $2,7 \cdot 10^{-10} \delta^3$ , оскільки їхній вплив складає менше 0,1 %, отримуємо інтенсивність люмінесценції нанофотонного елемента, надрукованого на внутрішній поверхні пакування на матовій поліпропіленовій плівці:

$$I = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} (1 + R/100) + R/100 (1,7 \cdot 10^{-5} \delta^2 + 0,0021\delta + 0,0697)). \quad (16)$$

Аналогічним чином для глянцевої поліпропіленової плівки отримуємо:

$$I = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} + R/100 (I_{3M} + (0,00005\delta^2 + 0,0015\delta + 0,3055) \cdot (-0,000009\delta^2 + 0,0059\delta + 0,0644))) = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} (1 + R/100) + R/100 \cdot (-4,5 \cdot 10^{-10} \delta^4 + 2,82 \cdot 10^{-7} \delta^3 + 9,32 \cdot 10^{-5} \delta^2 + 0,0019\delta + 0,019674)). \quad (17)$$

Знехтувавши значенням  $-4,5 \cdot 10^{-10} \delta^4$ , оскільки його вплив складає менше 0,1 %, отримуємо інтенсивність люмінесценції нанофотонного елемента, надрукованого на внутрішній поверхні пакування на глянцевої поліпропіленовій плівці:



$$I = k_C \cdot k_M \cdot k_{\text{суш}} (I_{3M} (1 + R/100) + R/100 (2,82 \cdot 10^{-7}\delta^3 + 9,32 \cdot 10^{-5}\delta^2 + 0,0019\delta + 0,019674)). \quad (18)$$

Аналогічно до випадку розрахунку залежностей (10) і (11), розраховують інтенсивність люмінесценції нанофотонного елемента, надрукованого на внутрішній поверхні пакування, у зоні  $\lambda = 400$  нм та  $\lambda = 525$  нм.

#### Висновки

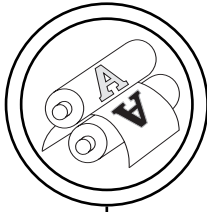
У результаті проведених досліджень було створено комплексну модель впливу пара-

метрів технологічного процесу виготовлення друкованих нанофотонних елементів, параметрів задруковуваного матеріалу, складу і властивостей нанофотонних елементів на їхні фотолюмінесцентні характеристики. Розроблена математична модель може бути використана для поліграфічного виготовлення нанофотонних елементів новітніх пакувань із наперед заданими фотолюмінесцентними характеристиками.

Дослідження проводилися за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках НДР №2873п.

#### Список використаної літератури

1. Шерстюк В. П. Інформаційно-комунікативні технології у пакувальній індустрії / В. П. Шерстюк, О. О. Сарапулова // Пакувальна індустрія (інноваційні технології) : Матеріали VII Науково-практичної конференції (21–24 травня 2013 р., м. Алушта, Україна). — Додаток до часопису «Упаковка». — 2013. — № 2. — К., 2013. — 136 с. — С. 26–38.
2. Sarapulova O. Nanophotonic, electro- and magnetoactive nanocomposites for printing and packaging / O. Sarapulova, V. Sherstiuk // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2014. — Vol. 590(1). — P. 251–260.
3. Sarapulova O. Luminescent nanosized composites for indicating and preventing compositional changes of packaged products in modern printed packaging / O. Sarapulova, V. Sherstiuk, V. Shvalagin // Nanoscience and Nanotechnology Letters. — 2013. — Vol. 5. — P. 1141–1146.
4. Шерстюк В. П. Люмінесцентні плівки на основі нанорозмірного оксиду цинка в полівинилпирролідоне і їх функціональні характеристики / В. П. Шерстюк, В. В. Швалагин, О. О. Сарапулова, В. М. Гранчак // VI Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки». Сборник наукових трудов. — Харків : ХНУРЕ, 2013. — 393 с. — С. 250–253.
5. Сарапулова О. О. Проблеми поліграфічного виготовлення новітніх пакувань з нанорозмірними фотоактивними елементами / О. О. Сарапулова, В. П. Шерстюк // Технологія і техніка друкарства. — 2013. — № 2. — С. 46–57.
6. Сарапулова О. О. Технологічні особливості нанесення нанофотонних елементів пакувань трафаретним способом друку / О. О. Сарапулова, В. П. Шерстюк // Технологія і техніка друкарства. — 2013. — № 3. — С. 18–26.
7. Сарапулова О. Особливості відтворення нанофотонних міток тампонним способом друку / О. Сарапулова, В. Шерстюк // Матеріали доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції з проблем видавничо-поліграфічної галузі. — 2014. — С. 56–58.



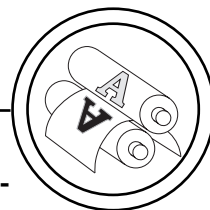
### References

1. Sherstiuk V. P. Informatsiino-komunikatyvni tekhnolohii u pakuvalnii industrii / V. P. Sherstiuk, O. O. Sarapulova // Pakovalna industriia (innovatsiini tekhnolohii) : Materialy VII Naukovo-praktychnoi konferentsii (21–24 travnia 2013 r., m. Alushta, Ukraina). — Dodatok do chasopysu «Upakovka». — 2013. — № 2. — K., 2013. — 136 s. — S. 26–38.
2. Sarapulova O. Nanophotonic, electro- and magnetoactive nanocomposites for printing and packaging / O. Sarapulova, V. Sherstiuk // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2014. — Vol. 590(1). — P. 251–260.
3. Sarapulova O. Luminescent nanosized composites for indicating and preventing compositional changes of packaged products in modern printed packaging / O. Sarapulova, V. Sherstiuk, V. Shvalagin // Nanoscience and Nanotechnology Letters. — 2013. — Vol. 5. — P. 1141–1146.
4. Sherstjuk V. P. Ljuminescentnye plenki na osnove nanorazmernogo oksida cinka v polivinilpirrolidone i ih funkcional'nye harakteristiki / V. P. Sherstjuk, V. V. Shvalagin, O. O. Sarapulova, V. M. Granchak // VI Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Funkcional'naja baza nanoelektroniki». Sbornik nauchnyh trudov. — Har'kov : HNURJe, 2013. — 393 s. — S. 250–253.
5. Sarapulova O. O. Problemy polihrafichnogo vyhotovlennia novitnikh pakovan z nanorozmirnymy fotoaktyvnymy elementamy / O. O. Sarapulova, V. P. Sherstiuk // Tekhnolohiia i tekhnika drugarstva. — 2013. — № 2. — S. 46–57.
6. Sarapulova O. O. Tekhnolohichni osoblyvosti nanesennia nanofotonnykh elementiv pakovan trafaretnym sposobom druku / O. O. Sarapulova, V. P. Sherstiuk // Tekhnolohiia i tekhnika drugarstva. — 2013. — № 3. — S. 18–26.
7. Sarapulova O. Osoblyvosti vidtvorennia nanofotonnykh mitok tamponnym sposobom druku / O. Sarapulova, V. Sherstiuk // Materialy dopovidei XVIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii z problem vydavnycho-polihrafichnoi haluzi. — 2014. — S. 56–58.

**В статье разработана комплексная модель на основе исследований влияния технологических параметров печати на процесс изготовления печатных нанофотонных элементов новейшей упаковки и на их фотолюминесцентные характеристики. Созданная комплексная модель позволяет определить фотолюминесцентные характеристики печатных покрытий с нанофотонными элементами путем учета технологических параметров, а также создавать печатные нанофотонные элементы с наперед заданными фотолюминесцентными характеристиками.**

**Ключевые слова:** комплексная модель; нанофотонные элементы; печать; новейшая упаковка; фотолюминесценция.

**In this article there is created the complex model, based on studies of the effect of technological parameters of printing on the process of manufacturing of printed nanophotonic elements of novel packaging and on their photoluminescent properties.**



**The created complex model allows to determine the photoluminescent characteristics of printed coatings with nanophotonic elements by taking into account technological parameters, and to create printed nanophotonic elements with predetermined photoluminescent properties.**

**Keywords: complex model; nanophotonic elements; printing; smart packaging; photoluminescence.**

Рецензент — Т. А. Роїк, д.т.н.,  
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 17.06.15

ISSN 2077-7264. — Технологія і техніка друкарства. — 2015. — № 3(49)