

*Т. В. ФАЛЬКО, О. В. САВВОВА, О. В. БАБІЧ*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗНЕБАРВЛЮЮЧИХ АГЕНТІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ БЕЗБАРВНОГО ТАРНОГО СКЛА

Проаналізовано інтенсивний попит на скляну тару, яка відрізняється високими експлуатаційними та естетико-декоративними характеристиками, демонструє тенденцію ринку до значного зростання за регіонами, видами продукції та областями застосування. Визначено основні способи та механізми освітлення та знебарвлення скляної тари, види знебарвлюючих агентів та їх вплив на кольорні характеристики скла. Сформульовано мету та завдання роботи, які визначають необхідність дослідження ефективності застосування знебарвлюючих агентів у промисловому виробництві безбарвного тарного скла. Наведено методологію визначення кольорних характеристик зразків CIELAB та CIE XYZ та програмного забезпечення для оптичної спектроскопії Chroma™. Обрано склад скла, кількість освітлюючих (сульфати, вугілля, оксид церію), знебарвлюючих агентів (селен, оксид кобальту) та у виробничих умовах отримано партію готової склотари. Дослідження кольорних характеристик скляної тари з різним вмістом знебарвлюючих агентів дозволили встановити, що насиченість кольору та кольорний тон регулюється вмістом знебарвлюючих агентів в залежності від вмісту оксиду заліза. Розроблена та впроваджена на виробництві в умовах ТОВ «Малинівський склозавод» безбарвна склотара з високими експлуатаційними властивостями відповідно до ДСТУ 10117 дозволяє суттєво підвищити конкурентоздатність вітчизняного тарного скла та сприяти стабілізації ринку в умовах сталого розвитку держави.

**Ключові слова:** тарне скло, знебарвлюючі агенти, властивості, промислове виробництво, прозорість

*T. V.FALKO, O. V. SAVVOVA, O. V. BABICH*

## RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF DISCOLORING AGENTS IN THE INDUSTRIAL PRODUCTION OF COLORLESS CONTAINER GLASS

The intensive demand for glass containers, which are distinguished by high operational and aesthetic and decorative characteristics, is analyzed, demonstrating a market trend towards significant growth by regions, types of products and areas of application. The main methods and mechanisms of lightening and discoloration of glass containers, types of discoloring agents and their influence on the color characteristics of glass are determined. The goal and objectives of the work are formulated, which determine the need to study the effectiveness of the use of discoloring agents in the industrial production of colorless container glass. The methodology for determining the color characteristics of CIELAB and CIE XYZ samples and the software for optical spectroscopy Chroma™ are presented. The composition of the glass and the amount of brightening (sulfates, carbon, cerium oxide) and decolorizing agents (selenium, cobalt oxide) were selected and a batch of finished glass containers was obtained under production conditions. Studies of the color characteristics of glass containers with different contents of decolorizing agents allowed us to establish that the color saturation and color tone are regulated by the content of decolorizing agents depending on the content of iron oxide. Colorless glass containers with high performance properties in accordance with SSTU 10117 developed and implemented in production under the conditions of Malynivsky Glass Plant LLC will significantly increase the competitiveness of domestic container glass and contribute to the stabilization of the market in the conditions of sustainable development of the state.

**Keywords:** container glass, decolorizing agents, properties, industrial production, transparency

**Вступ.** На сьогоднішній день інтенсивний попит на скляну тару, яка відрізняється високими експлуатаційними та естетико-декоративними характеристиками, демонструє тенденцію до значного зростання за регіонами, видами продукції та областями застосування. Незважаючи на високу вартість виробництва з точки зору часу та ресурсів та вищий рівень тепловиділення та забруднення навколишнього середовища порівняно з процесами переробки виробники склотари, підприємства ефективно впроваджують економічні та екологічні стратегії управління зворотними ланцюгами поставок у поєднанні з традиційними [1].

Виробництво та подальша переробка скляного панування, яке легшим та має менший об'єм, приносять суттєві екологічні переваги шляхом зменшення викидів CO<sub>2</sub>, та є економічно вигідними, заощаджуючи сировину, відновлюючи енергію та роблячи ці практики впровадження у скляне виробництво засад «зеленої хімії» ефективними та сталими [2].

Поряд з цим розширюється ринок фармацевтичної та ексклюзивної харчової та алкогольної продукції, яка вимагає забезпечення високих естетико-декоративних показників без значного підвищення вартості продукції. Особливого значення набуває виробництво прозорого

екологічного пакування, яке відрізняється значним попитом у харчовій та фармацевтичних галузях.

Аналітиками Pro-Consulting було проведено дослідження ринку безбарвної склотари та встановлено, що ринок вказаної продукції на Україні наразі демонструє потенціал до росту, пов'язаний зі світовими трендами на екологічне виробництво та здоровий спосіб життя [3]. Глобальний ринок прозорої упаковки у 2024 році оцінювався в 84,2 млрд доларів США і, за оцінками, зростатиме на 6,1% у середньому з 2025 по 2034 рік, а обсяг виробництва, досягне 182,9 млн тон до 2034 року (рис. 1) [3].

Прогнозні тенденції ринку полягають у відновлення об'ємів виробництва скляної тари за рахунок збільшення споживання та виготовлення сидру; використання склобою; розширення асортименту продукції через поступову мінімізацію використання пластику та інтенсифікацію експортних поставок.

**Літературний огляд.** Забезпечення високої прозорості скляної тари є неодмінним атрибутом її високої конкурентної здатності на ринку. Вплив вмісту заліза в скляних пляшках з кварцового піску особливо важливий. Вміст заліза в кварцовому піску для прозорих скловиробів регламентується ДСТУ Б В.2.7-131:2007: не більше:  $0,015 \pm 0,02$  % для

виробництва особливо чистих видів скла, пілокварцу та виробництва скловиробів високої світлопрозорості. Також для забезпечення високої світлопроникності скла обов'язково регламентується вміст заліза у польовому шпаті та вапняку.

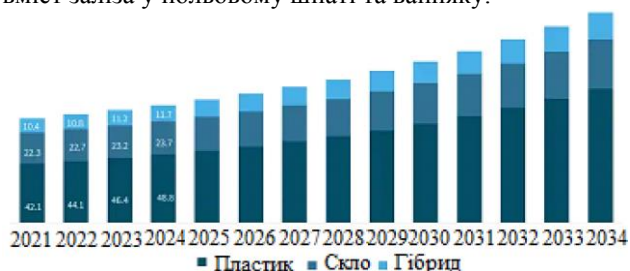
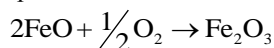


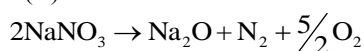
Рисунок 1 – Ріст ринку прозорого пакування (2021–2034 рр.)

Для освітлення скла традиційно застосовують кисневі, сірчані, галогенідні та композитні компоненти, які відрізняються за механізмом дії.

*Хімічне знебарвлення.* В скловарінні прагнуть забезпечити умови переведення у структурі скла  $\text{FeO}$ , який надає склу синій колір, в  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – жовтий колір, оскільки заліза оксид (III) менш інтенсивно забарвлює скло за реакцією:



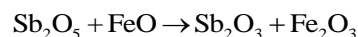
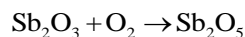
Значний вплив  $\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Fe}^{3+}$  створює зеленуватий відтінок у склі, інтенсивність якого залежить від концентрації заліза. З цією метою використовують хімічні знебарвлювачі, переважно натрієву селітру  $\text{NaNO}_3$  й оксид миш'яку  $\text{As}_2\text{O}_3$ : застосовують оксид арсену 0,3–0,5 мас. % у поєднанні з селітрою, якою необхідно вводити 4–8 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}$ . Принцип їх дії заснований на виділенні кисню, який утворюється при розкладанні знебарвлювачів і його взаємодії з оксидом заліза (II):



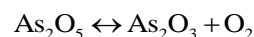
Нітрат калію діє як окиснювач для підтримки окисно-відновної рівноваги та окислювальної природи полум'я, що створює кисле середовище.



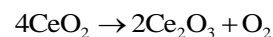
У присутності  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , який використовується як рафінуючий агент у склі з сильним окислювачем, наприклад, нітратом калію або натрію,  $\text{Sb}^{3+}$  окислюється до  $\text{Sb}^{5+}$ , що сприяє умові для переведення  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$ , але швидкість охолодження між 500 – 600 °C впливає на загальну окисно-відновну реакцію, яка рухається вліво при дифузії  $\text{O}_2$  в середовищі (окиснення) та вправо при дифузії  $\text{O}_2$  з середовища (відновлення) [7]. Наявність у склі  $\text{Sb}^{3+}$ , що має менший коефіцієнт дифузії порівняно з одновалентними іонами, виступає утворювачем сітки скла.



Найбільш ефективним є застосування  $\text{As}_2\text{O}_3$ . Це пов'язано з тим, що на відміну від  $\text{NaNO}_3$  оксид миш'яку виділяє свій кисень при більш високих температурах за наступною схемою: спочатку при температурах 300 – 400 °C  $\text{As}_2\text{O}_3$  окислюється до  $\text{As}_2\text{O}_5$  (за рахунок кисню, утвореного при розкладанні  $\text{NaNO}_3$ ), потім при високих температурах оксид миш'яку (V) дисоціює з утворенням оксиду і виділенням кисню за реакцією:



Останнім часом в якості хімічного знебарвлювача все більше використовують діоксид церію, окислююча дія якого заснована на відновленні до оксиду церію і виділенні вільного кисню за реакцією:



Оксид церію  $\text{CeO}_2$  є значно сильнішим окиснювачем порівняно з іншими елементами  $\text{Sb} < \text{As} < \text{Sn} < \text{Cu} < \text{Ce}$  для переведення  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$ . Однак, вводити оксид церію більше 1 мас. % у скло небажано через можливу появу жовтуватих відтінків

Більшість галузей промисловості використовують разом сульфати та вуглець для кращого рафінування скла, але наявність вказаних компонентів створює відновне середовище, що призводить до появи синьо-зеленого відтінку скла. Це пояснюється тим, що координаційний стан  $\text{Fe}^{3+}$  змінюється на  $\text{Fe}^{2+}$ , який має максимальне поглинання в ближньому інфрачервоному діапазоні (близько 1,1 мкм), настільки широке, що поширюється у видиму область – в області довгих довжин хвиль, що відповідає червоному кольору, і це призводить до меншого пропускання у видимій області, а тривалентний стан заліза є слабшим барвником порівняно зі станом заліза (III) [7].

У промисловості використовуються різні методи видалення відтінку зі скла, але найпоширенішим методом є використання фізичних знебарвлювачів, таких як кобальт-селен, оксид нікелю та оксид марганцю, який використовується як фізичний знебарвлювач з римського періоду [7].

*Фізичне знебарвлення* скла засноване на введенні до складу скла невеликих домішок барвників, які компенсують забарвлення скла. Недоліком фізичного знебарвлення є те, що загальна світлопрозорість скла декілька зменшується. Для фізичного знебарвлення застосовують сполуки рідкісноземельних елементів [5] (РЗЕ)  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  та  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , які забарвлюють стекла в рожеві та пурпурні кольори в доповненні до зелених. Оксид неодиму є ефективним фізичним знебарвлювачем, оскільки він природно інертний за високих температур, має лише ступінь окиснення +3, прагне залишатися в стані  $\text{Nd}^{3+}$  в умовах окиснення та не впливає на окисно-відновні процеси розплавленого скла. Він також не

погіршує пропускання скла у видимій області, хоча при вищій концентрації  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  спостерігається деяка слабка смуга поглинання на певних довжинах хвиль у видимій області. Фіолетовий колір  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  стабільний при високій температурі плавлення скла  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ , що діє як протилежний колір жовтому кольору, що надається іонами заліза ( $\text{Fe}^{3+}$ ) [7].

При одночасному застосуванні  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  та  $\text{Er}_2\text{O}_3$  залежно від співвідношення у знебарвлюючій суміші кольоровий відтінок скла буде змінюватися. У разі переважання в суміші оксиду ербію, кольоровий відтінок скла буде знаходитись в межах довжин хвиль  $520 - 540\text{ нм}$ , а коли переважатиме неодиму оксид – кольоровий відтінок зсунеться у бік довжин хвиль  $560-570\text{ нм}$ , і відтінок скла зміниться з фіолетово-червоного на червоно-фіолетовий. У склі, в якому переважає  $\text{FeO}$ , а колір має блакитно-зелений відтінок знебарвлююча суміш повинна містити більшу кількість ербію оксиду, а коли скло має жовтувато-зелений відтінок, тобто коли в ньому переважає  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , тоді в суміші треба збільшити вміст неодиму оксиду.

Комбінація  $\text{Co-Se}$  використовується як знебарвлювач, однак за умов високого окислення  $\text{Se}$  спостерігається тенденція до знебарвлення в окисних умовах, тому його не застосовують разом з  $\text{KNO}_3$ . Дія оксиду кобальту як знебарвлюючого агента обмежується його застосування для стекел з вищим вмістом заліза  $\geq 0,1\text{ мас.}\%$ . Летка природа  $\text{Se}$  збільшує вартість виробництва, а додавання  $\text{NiO}$  знижує міцність скла на розтяг, за рахунок утворення у склі сульфиду нікелю [7].

Авторами [6] було досліджено можливість застосування  $\text{Se}$  та  $\text{Co}$  як знебарвлюючих агентів для отримання безбарвного скла з кольорового склобою, що містить високий вміст оксиду заліза. Отримані результати показали, що іони  $\text{Fe}$ , присутні у склоподібній матриці, переважно знаходяться у формі іонів  $\text{Fe}^{3+}$ . Для дослідження отриманих стекел використовувалися рентгенівська флуоресценція (XRF), електронний спіновий резонанс (ESR), УФ-видимий спектр та інфрачервоний спектроскопічний аналіз з Фур'є-трансформатором (FTIR). Результати показують, що всі зразки мають сильне поглинання ультрафіолетового переносу заряду, що складається з двох або трьох смуг в діапазоні довжин хвиль  $228 - 232$ ,  $274 - 278$  та  $304 - 309\text{ нм}$ .

Отже, знебарвлення скляної тари є складним фізико-хімічним процесом, який вимагає обґрунтованого підходу, зважаючи на високі вимоги щодо властивостей скляної тари та її естетико – декоративних характеристик. Особливого підходу вимагає забезпечення знебарвлення тарних стекел у виробничих умовах, де відтворюваність результатів повинна досягати надвисокого рівня, а технологія повинна бути гнучкою до змінних факторів, як то зміни сировини та вимог до кольорових відтінків.

**Мета роботи.** Метою роботи є дослідження ефективності застосування знебарвлюючих агентів при промисловому виробництві безбарвного тарного скла.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- встановлення різних типів знебарвлюючих агентів та фізико-хімічного механізму знебарвлення;
- вибір типів знебарвлюючих агентів для знебарвлення тарного скла;
- дослідження колориметричних характеристик скляної тари;
- оцінка ефективності застосування ефективності застосування знебарвлюючих агентів при виробництві безбарвного тарного скла в умовах діючого підприємства.

Всі пляшки виготовлені в умовах технологічного процесу виробництва склотари на підприємстві ТОВ «Малинівський склозавод». Для приготування шихти використовували наступну сировину: пісок кварцовий (ПК-030-3), вапняк, соду кальциновану, сульфат натрію, польовий шпат, доломіт, оксид церію (IV), селен, оксид кобальту. Варка стекел проводилася в регенеративно-скловарній печі HORN System «DEEP END MELTER», з попереднім нагрівом повітря та підковоподібним напрямком полум'я. Продуктивність печі складає  $240\text{ т/добу}$ , температура варки скла  $1484 - 1556\text{ }^\circ\text{C}$ .

Для визначення колориметричних характеристик зразків використовували спектрофотометр NS 800. При джерелі світла (C, A, D65) координати кольору в колориметричній системі CIELAB дорівнюють:  $L^*$ ;  $a^*$ ;  $b^*$ .

Кольорова шкала CIELAB – це тривимірна кольорова модель, розроблена Міжнародною комісією з освітлення (CIE) у 1976 році. Вона базується на тристимульних значеннях кольору, які є кількістю червоного, зеленого та синього світла, необхідною для отримання цього кольору.

Показник  $L^*$  представляє яскравість, або наскільки яскравим чи темним є колір. Значення коливається від 0 (чорний) до 100 (білий). Показник  $a^*$  представляє червоно-зелену вісь, де від'ємні значення представляють зелений, а позитивні – червоний. Показник  $b^*$  представляє синьо-жовту вісь, де від'ємні значення представляють синій, а позитивні – жовтий (рис. 2). Значення показників  $a^*$  та  $b^*$  коливаються від  $-128$  до  $+128$  [8, 9].

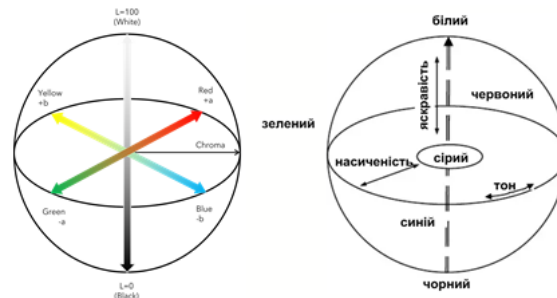


Рисунок 2 – Кольорова шкала CIELAB та HSB [10]

За діаграмою хроматичності колірного простору CIE XYZ (трикутник Максвелла) визначається

зовнішня криволінійна межа від 380 до 780 нм до 520 нм є спектральним місцем монохроматичних кольорів [11]. Пряма лінія від 380 до 780 нм є фіолетовою лінією. Точка хроматичності джерела світла – D65 (рис. 3). Показник DWL відповідає доміантній довжині хвилі, яка визначає максимальне поглинання світла зразку.

Обробка результатів досліджень здійснювалась Chroma™ – це універсальне, незалежне від пристрою програмне забезпечення для оптичної спектроскопії (пропускання, поглинання, відбиття) з інтегрованою оцінкою кольору та управлінням даними, а також спеціальними функціями.

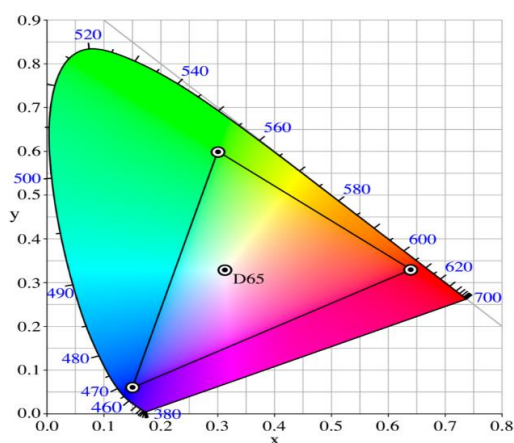


Рисунок 3 – Діаграма хроматичності кольорного простору CIE XYZ (трикутник Максвелла)

**Результати роботи та їх обговорення.** Для дослідження ефективності знебарвлюючих агентів було обрано скло складу (мас. %):  $\text{SiO}_2$  – 72,4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2,2;  $\Sigma\text{CaO} + \text{MgO}$  – 11,9;  $\Sigma\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  – 13,5, та є близьким до меж компонентів для виробничого складу прозорих тарних стекел (мас. %):  $\text{SiO}_2$  –  $72,0 \pm 1,5$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $2,0 \pm 0,5$ ;  $\Sigma\text{CaO} + \text{MgO}$  –  $12,5 \pm 1,5$ ;  $\Sigma\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  –  $13,5 \pm 1,5$ ;  $\text{SO}_3$  – не більше 0,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – не більше 0,015.

До складу дослідного скла було введено наступні освітлюючі та знебарвлюючі агенти на 2500 кг готового скла: вугль – 400 г; селен – 30 г; оксид кобальту – 3,5 г; оксид церію – 250 г; сульфат натрію – 18300 г. У виробничих умовах кількість вказаних компонентів вводилась з розрахунку на 50000 кг готового скла (табл. 1).

Дослідження кольорних характеристик скляної тари з різним вмістом знебарвлюючих агентів дозволили встановити, що показник  $L^* \approx 95$  знаходиться в межах допустимих значень для одержання скла з високою світлопроникною здатністю. Зміщення показників  $a^*$  до від'ємних значень компенсується Se;  $b^*$  позитивних значень компенсується  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . Чим вищий вміст загального заліза тим більша кількість знебарвлюючих агентів може бути використана. В цілому для ідеально білого скла координати  $a^*$  та  $b^*$  повинні наближатися до нуля, а показник  $L^*$  до 100. Однак, на практиці різні

відтінки прозорого скла, які визначаються виробниками та попитом на продукцію визначаються конкретними значеннями  $L^*$ ;  $a^*$ ;  $b^*$  та є унікальними для торгової марки. Показник DWL, визначає максимальне поглинання світла зразку на довжині 553 та 565 нм, який вказує на зміщення від області зеленого спектру до жовтого видимого спектру (рис. 4).

Таблиця 1 – Характеристики колірності, вміст знебарвлюючих компонентів та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у складі скляної тари

Характеристика колірності	Нумерація скла				
	1	2	3	4	5
L	95,73	94,57	95,29	95,55	95,18
$a^*$	-0,31	-0,5	-0,29	-0,25	-0,32
$b^*$	0,32	0,62	0,41	0,33	0,55
DWL	553,7	560,7	561,1	558,7	565,1
Вміст, г $\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,0711	0,0741	0,0714	0,0560	0,0571
Вміст, г	1	2	3	4	5
Se	700	900	1000	1000	1000
$\text{Co}_3\text{O}_4$	90	110	120	120	120
CeO2	5000	5000	5000	5000	5000
C	7000	7000	7000	7000	7000
Se/ $\text{Co}_3\text{O}_4$	7,78	8,18	8,33	8,33	8,33

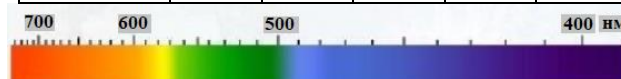


Рисунок 4 – Електромагнітний спектр

Саме забезпечення регульованих показників колірності скла дозволяє отримати на ТОВ «Малинівський склозавод» вишукану, ексклюзивну склотару на спеціального призначення.

**Висновки.** Проаналізовано ринок безбарвної склотари та встановлено, що ринок вказаної продукції в Україні наразі демонструє потенціал до росту, пов'язаний зі світовими трендами на екологічне виробництво та здоровий спосіб життя. Визначено механізм та домішки для фізичного, хімічного освітлення та знебарвлення скла. Наведено методологію визначення кольорних характеристик склотари. В умовах промислового виробництва ТОВ «Малинівський склозавод» встановлено вміст знебарвлюючих компонентів та їх співвідношення в залежності від вмісту  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та показників за шкалами CIELAB та CIE XYZ та одержано партію склотари з високими експлуатаційними характеристиками відповідно до ДСТУ 10117. Впровадження інновацій на скляних вітчизняних виробництвах дозволить суттєво збільшити конкурентоздатність скловиробів та розширити ринок склотари із застосуванням сучасних технологій.

## Список літератури

1. Borumand A., Marandi A., Nookabadi A. S., Atan Z. An oracle-based algorithm for robust planning of production routing problems in closed-loop supply chains of beverage glass bottles. *Omega*. 2024. Vol. 122. 102939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102939>.
2. Vinci G., D'Ascenzo F., Esposito A., Musarra M. 5 - Glass Beverages Packaging: Innovation by Sustainable Production. *Trends in Beverage Packaging*. 2019. Vol. 16. P. 105–133. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816683-3.00005-0>
3. *Transparent Packaging Market - By Material, By Packaging Type, By End Use Industry - Global Forecast, 2025 – 2034*. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/transparent-packaging-market>
4. *Аналіз ринку прозорої склотари в Україні*. URL: <https://pro-consulting.ua/ua>
5. Meechoowas E., Petchareanmongko B., Jampeerung P., Tapasa K.. The Effect of Decolorizing Agent on the Optical Properties of High Iron Contents Soda-Lime Silicate Glass. *Key Engineering Materials Submitted*. 2017. Vol. 766. P. 28–33. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.766.28>
6. El-Badry Kh. M., Abo-Naf S. M., Saad E. A., Marzouk S. Y., Abd El-Fattah Marzouk M.. Efficiency of decolorizing agents in the production of colorless commercial glasses from municipal glass cullet wastes lass. *Physics and Chemistry*. 2010. Vol. 36. P. 190–198 <https://doi.org/10.1134/S1087659610020070>
7. Haider Saleem M., Ali S., Ali. S. An innovative approach towards decolorization of tint and enhancing the optical & physical properties of high iron Na<sub>2</sub>O–CaO–SiO<sub>2</sub> glass by co-doping with Ce<sup>4+</sup>/Nd<sup>3+</sup>: An experimental and comparative study. *Optical Materials*. 2024. Vol. 157. Part 1. 116160. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116160>
8. Cinko U.O., Becerir B. Computing characteristics of color difference formulas for regular coordinate changes in CIELAB color space. *Textile Research Journal*. 2024. Vol. 95 (11-12). P. 1387–1408. <https://doi.org/10.1177/00405175241278025>
9. Cinko O.U., Becerir B. Dependence of color difference formulae on regular changes of color coordinates in CIELAB color space. *Industria Textila*. 2019. 70(3). P. 248–254. <https://doi.org/10.35530/IT.070.03.1525>
10. Meskaldji K., Boucherkha S., Chikhi S. Color quantization and its impact on color histogram based image retrieval accuracy. *First International Conference on Networked Digital Technologies*. 2009. P. 515–517, <https://doi.org/10.1109/NDT.2009.5272135>
11. *What is Color Theory: A Guide for Artists and Designers*. URL: <https://russell-collection.com/what-is-color-theory/>
12. Гавриляк М.М. *Теорія кольору і кольороутворення*. Чернівці : Чернівецький нац. університет, 2022. 263 с.

## References (transliterated)

1. Borumand A., Marandi A., Nookabadi A. S., Atan Z. An oracle-based algorithm for robust planning of production routing problems in closed-loop supply chains of beverage glass bottles. *Omega*. 2024. Vol. 122, 102939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102939>.
2. Vinci G., D'Ascenzo F., Esposito A., Musarra M. 5 - Glass Beverages Packaging: Innovation by Sustainable Production. *Trends in Beverage Packaging*. 2019, Vol. 16, pp. 105–133. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816683-3.00005-0>
3. *Transparent Packaging Market - By Material, By Packaging Type, By End Use Industry - Global Forecast, 2025 – 2034*. Available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/transparent-packaging-market> (accessed 15.09.2025).
4. *Analiz rynku prozoroj sklotary v Ukraini*. [Analysis of the market for glass windows in Ukraine]. Available at: <https://pro-consulting.ua/ua> (accessed 15.09.2025).
5. Meechoowas E., Petchareanmongko B., Jampeerung P., Tapasa K.. The Effect of Decolorizing Agent on the Optical Properties of High Iron Contents Soda-Lime Silicate Glass. *Key Engineering Materials Submitted*. 2017, Vol. 766, pp. 28–33. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.766.28>
6. El-Badry Kh. M., Abo-Naf S. M., Saad E. A., Marzouk S. Y., Abd El-Fattah Marzouk M.. Efficiency of decolorizing agents in the production of colorless commercial glasses from municipal glass cullet wastes lass. *Physics and Chemistry*. 2010, Vol. 36, pp. 190–198 <https://doi.org/10.1134/S1087659610020070>
7. Haider Saleem M., Ali S., Ali. S. An innovative approach towards decolorization of tint and enhancing the optical & physical properties of high iron Na<sub>2</sub>O–CaO–SiO<sub>2</sub> glass by co-doping with Ce<sup>4+</sup>/Nd<sup>3+</sup>: An experimental and comparative study. *Optical Materials*. 2024, Vol. 157, Part 1, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116160>
8. Cinko U.O., Becerir B. Computing characteristics of color difference formulas for regular coordinate changes in CIELAB color space. *Textile Research Journal*. 2024, Vol. 95 (11-12), pp. 1387–1408. <https://doi.org/10.1177/00405175241278025>
9. Cinko O.U., Becerir B. Dependence of color difference formulae on regular changes of color coordinates in CIELAB color space. *Industria Textila*. 2019, 70(3), pp. 248–254. <https://doi.org/10.35530/IT.070.03.1525>
10. Meskaldji K., Boucherkha S., Chikhi S. Color quantization and its impact on color histogram based image retrieval accuracy. *First International Conference on Networked Digital Technologies*. 2009, pp. 515–517, <https://doi.org/10.1109/NDT.2009.5272135>
11. *What is Color Theory: A Guide for Artists and Designers*. Available at: <https://russell-collection.com/what-is-color-theory/> (accessed 15.09.2025).
12. Havryliak M.M. *Teoriia koloru i koloroutvorennia* [Havryliak M.M. Color theory and color formation]. Chernivtsi, Chernivtsi National University, 2022. 263 p.

## Відомості про авторів / About the Authors

**Фалько Тетяна Валентинівна (Falko Tetiana)** – аспірантка кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9424-4319>; e-mail: [Tetyana.Falko@kname.edu.ua](mailto:Tetyana.Falko@kname.edu.ua)

**Савцова Оксана Вікторівна (Savvova Oksana)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-2274>; e-mail: [savvova\\_oksana@ukr.net](mailto:savvova_oksana@ukr.net)

**Бабіч Олена Вікторівна (Babich Olena)** – кандидат технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0821-1585>; e-mail: [lenysjababich@gmail.com](mailto:lenysjababich@gmail.com)