

О. П. РИЖОВА, М. А. ХОХЛОВ, С. Г. ПОЛОЖАЙ

РОЗРАХУНОК СКЛАДУ ЕМАЛІ ІЗ ЗАДАНИМ КОМПЛЕКСОМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБ'ЄДНАННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

Досліджено вплив TiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 та CaO на властивості безфтористих фрит та оптико-колірні характеристики емалевих покриттів червоного кольору. При використанні симплекс-центроїдного плану експерименту виявлено наступне обмеження співвідношення компонентів, мол. %: $\text{TiO}_2 - 3,63 - 8,5$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 2,0 - 3,63$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,0 - 5,25$; $\text{CaO} - 2,0 - 5,25$. Отримано гладкі, щільні, яскравозабарвлені склопокриття червоного кольору з гарним блиском та заданими колірними характеристиками, які можуть бути рекомендовані для нанесення їх на сталеві вироби господарчо-побутового призначення. За допомогою методів побудови регресійних моделей з мінімізацією суми квадратів відхилень експериментальних і розрахункових точок та лінійного програмування для пошуку оптимального рішення виявлений склад безфтористої склоемалі для яскравозабарвлених червоних покриттів.

Ключові слова: склопокриття, безфтористі, пігментне забарвлення, регресійні моделі, властивості емалей.

Исследовано влияние TiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 и CaO на свойства бесфтористых фритт и оптико-цветовые характеристики эмалевых покрытий красного цвета. При использовании симплекс-центроидного плана эксперимента выявлено следующее ограничение соотношения компонентов, мол. %: $\text{TiO}_2 - 3,63 - 8,5$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 2,0 - 3,63$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,0 - 5,25$; $\text{CaO} - 2,0 - 5,25$. Получены гладкие, плотные, яркоокрашенные стеклопокрытия красного цвета с хорошим блеском и заданными цветовыми характеристиками, которые могут быть рекомендованы для нанесения их на стальные изделия хозяйственно-бытового назначения. С помощью методов построения регрессионных моделей с минимизацией суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных точек и линейного программирования для поиска оптимального решения обнаружен состав бесфтористой стеклоэмали для яркоокрашенных красных покрытий.

Ключевые слова: стеклопокрытия, бесфтористые, пигментное окрашивание, регрессионные модели, свойства эмалей.

There has been researched the effect of TiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 and CaO to properties of unfluoridated frits and optical-color characteristics of the coatings, pigmented with selenium cadmium red. Using a simplex-centroid experimental plan was identified the following restriction ratio of the components, mol. %: $\text{TiO}_2 - 3,63 - 8,5$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 2,0 - 3,63$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,0 - 5,25$; $\text{CaO} - 2,0 - 5,25$. A smooth, dense, brightly colored red glass coatings with good gloss and color characteristics specified were obtained. They can be recommended for application on their steel products for household purposes. Preliminary calculations of the relevant properties of glass from a certain area depending on changes in their structure significantly reduce the amount of experimental work, however, it is necessary to establish the most general quantitative regularities relationship between the chemical composition of glass and their properties that affect the conditions for the formation of coatings and their indicators quality. The vitreous composition of unfluoridated brightly colored red coating was found for using the methods of construction of regression models with the minimization of the sum of squared deviations of the experimental and calculated points and linear programming for optimal solution.

Keywords: glass coatings, unfluoridated, pigment coloration, regression models, the properties of enamels.

Вступ. Мета багатьох експериментальних досліджень у хімічній технології формулюється у вигляді наступних завдань: визначення оптимальних умов процесу, оптимального режиму, максимальних або мінімальних значень різних параметрів та ін. Найчастіше трапляються випадки необхідності встановлення оптимального складу матеріалу, який задовольняв би вирішенню поставлених завдань. При виборі такого складу, як правило, основною вимогою до нього є забезпечення комплексу необхідних властивостей. Завдання такого роду поширені в скляній, емалювальній і керамічній промисловості, де до матеріалів, що виробляються, пред'являються сукупні вимоги по експлуатаційним і декоративним характеристикам [1].

Розробка складів базового скла для отримання яскравозабарвлених емалевих покриттів на зовнішній поверхні посудних виробів відноситься до даного виду завдань і передбачає забезпечення відповідних значень розтічності та водостійкості фрит, а також оптико-колірних характеристик покриттів.

Здійснити підбір складів експериментальним шляхом не завжди є можливим через іноді протилежний характер впливу оксидів на різні властивості скла, що робить пошук доволі трудомістким, дорогим і тривалим процесом, а також не гарантує знаходження дійсно оптимального складу. Попередні розрахунки відповідних властивостей скла в залежності від зміни його складу значною мірою

скоротять обсяг експериментальних робіт, однак для цього необхідно встановити найбільш загальні кількісні закономірності взаємозв'язку між хімічним складом скла і його властивостями, які впливають на умови формування покриттів та показники якості [2].

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка складу безфтористої склоемалі для отримання яскравозабарвлених покриттів за допомогою методів побудови регресійних моделей з мінімізацією суми квадратів відхилень експериментальних і розрахункових точок та лінійного програмування для пошуку оптимального рішення.

Методика виконання експерименту.

Фізико-хімічні властивості емалевого скла і покриттів визначали за стандартними методиками:

- розтічність фрит (R) – за ГОСТ 24405-80;
- водостійкість фрит (W) – за ГОСТ 10134.1-82;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) та температуру початку розм'якшення (ТПР) – на автоматичному кварцовому дилатометрі ДКВ-5А;

- коефіцієнт дифузного відбиття (КДВ), колірний тон (λ), чистоту кольору (P) та світлоту (L) – на компараторі кольору КЦ-3;

- коефіцієнт дзеркального відбиття (КДзВ) покриттів вимірювали на блискомірі ФБ-2;

Результати експерименту та їх обговорення.

В результаті попередніх досліджень [3] було знайдено раціональне співвідношення компонентів

SiO_2 , B_2O_3 , $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ в безфтористій склоемалі для отримання яскравозабарвлених покриттів. В даному експерименті досліджено вплив компонентів TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 та CaO на властивості склофрит та колірні характеристики червоних покриттів.

Діоксид титану надає емалі ряд цінних властивостей, таких як підвищення хімічної стійкості, зниження температури варки, а також забезпечує заглушеність емалевого шару, за ступенем якої можна спрогнозувати кінцевий колір покриття [4]. Присутність в покривних емалях оксиду алюмінію регулює вязкість расплавів і підвищує хімічну стійкість покриття. Фосфорний ангідрид викликає зниження розчинності діоксиду титану в розплавах, що сприяє кристалізації його при малих концентраціях в емалях [5]. Оксид кальцію в силікатних емалях добре впливає на розтічність та змочувальну здатність, хімічну стійкість емалевих фрит та блиск покриттів [6].

Оптимізація складу багатокомпонентної склофрити навіть у вузькій області досліджень при зміні невеликої кількості факторів, тобто 4 компонентів емалі, як у нашому випадку, є найскладнішою задачею. При виконанні досліджень необхідно вирішити два основних завдання – максимально зменшити кількість експериментальних точок, що вирішує питання часу і вартості проведених досліджень, а також знайти оптимальну точку складу за комплексом властивостей, за якими отримані математичні моделі.

Для побудови експерименту був використаний симплекс-центроїдний план 4-го порядку, згідно якого експериментальні точки розташовуються у вершинах тетраедру, серединах ребер, центрах граней та у центрі самого тетраедру (рис. 1). Вміст кожного із дослідних компонентів TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , CaO змінювався від 2,0 до 8,5 мол.%, сумарна кількість всіх оксидів – 14,5 мол.% (табл. 1).

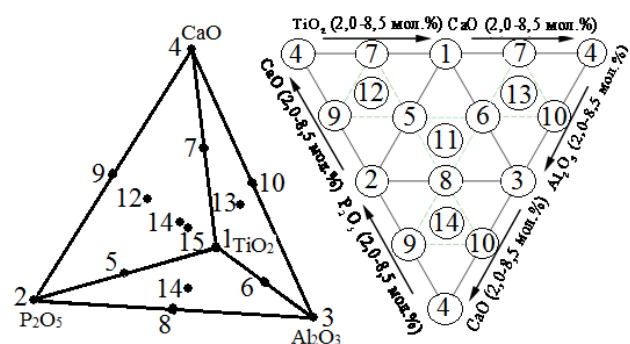


Рис. 1 – Симплекс-центроїдний план експерименту 4-го порядку та номери склооснов

Варка дослідного скла проводилася в електричній печі з карбідкремнієвими нагрівачами у шамотних тиглях при температурі 1250–1300 С з послідуною грануляцією розплаву у воді. Готовність емалевого скла перевіряли пробами на «нитку» і «коржик».

Найбільшу прозорість мають емалі з мінімальним вмістом P_2O_5 та підвищеним вмістом TiO_2 . Зі збільшенням кількості P_2O_5 в складах

дослідних емалей зростає заглушеність «коржика». Розплав емалі з максимальним вмістом фосфорного ангідриду під час фритуння на воду утворив суцільний заглушений кусок шорсткого скла. Розділення цього скла в процесі варки на дві рідини різної густини вірогідно можна пояснити утворенням двох скловидних фаз – силікатної та фосфатної.

Таблиця 1 – План експерименту в псевдокомпонентах та вміст дослідних оксидів

№	План в псевдокомпонентах				Вміст дослідних оксидів, мол.%			
	x_1 (TiO_2)	x_2 (P_2O_5)	x_3 (Al_2O_3)	x_4 (CaO)	TiO_2	P_2O_5	Al_2O_3	CaO
1	1	0	0	0	8,5	2,0	2,0	2,0
2	0	1	0	0	2,0	8,5	2,0	2,0
3	0	0	1	0	2,0	2,0	8,5	2,0
4	0	0	0	1	2,0	2,0	2,0	8,5
5	1/2	1/2	0	0	5,25	5,25	2,0	2,0
6	1/2	0	1/2	0	5,25	2,0	5,25	2,0
7	1/2	0	0	1/2	5,25	2,0	2,0	5,25
8	0	1/2	1/2	0	2,0	5,25	5,25	2,0
9	0	1/2	0	1/2	2,0	5,25	2,0	5,25
10	0	0	1/2	1/2	2,0	2,0	5,25	5,25
11	1/3	1/3	1/3	0	4,17	4,17	4,16	2,0
12	1/3	1/3	0	1/3	4,17	4,17	2,0	4,16
13	1/3	0	1/3	1/3	4,17	2,0	4,17	4,16
14	0	1/3	1/3	1/3	2,0	4,17	4,17	4,16
15	1/4	1/4	1/4	1/4	3,63	3,63	3,62	3,62

Для дослідних склофрит визначали експериментальним шляхом за стандартними методиками властивості, які представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Властивостей дослідних склофрит

№	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-7}$, град $^{-1}$	ТПР, °С	Розтічність, R, мм	Водостійкість, W	
				Витрати 0,01н НСІ, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$	Клас водостійкості
1	101	575	41	0,14	2/98
2	74	615	17	$\geq 0,85$	4/98
3	97	570	26	0,18	2/98
4	102	570	35	0,38	3/98
5	102	585	25	0,11	2/98
6	94	570	34	0,11	2/98
7	98	580	35	0,19	2/98
8	99	570	25	0,16	2/98
9	103	590	23	0,30	3/98
10	109	550	35	0,30	3/98
11	101	575	26	0,09	1/98
12	102	590	33	0,23	3/98
13	101	570	32	0,10	1/98
14	116	575	29	0,10	1/98
15	112	570	32	0,13	2/98

Аналіз зміни показника ТКЛР (табл. 2) свідчить про те, що всі емалі мають розбіг значень у межах $(94-116) \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$, крім емалі №2 з максимальним P_2O_5 – $74 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Дилатометрична крива ТКЛР цього скла має характерну конфігурацію з так званою «полицею», що свідчить про його двофазну структуру. Крім того, з підвищенням вмісту

P_2O_5 в емалях ТПР підвищується до 610 С. Протилежну дію чинить збільшення вмісту TiO_2 в дослідних емалях – ТПР знижуються до 575 °С. Аналогічний вплив цих оксидів спостерігається при аналізі важливої технологічної властивості – розтічності (рис. 2).

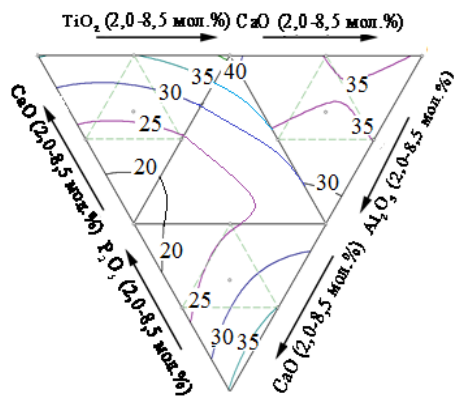


Рис. 2 – Залежність розтічності (мм) від вмісту дослідних оксидів

При визначенні в лабораторних умовах водостійкості скла з максимальним вмістом P_2O_5 (табл. 2) було неможливо визначити точну кількість витраченого 0,01н НСІ на титрування, оскільки його кількість перевищила обсяг 3,5мл, а сама рідина, в якій знаходилось скло, у процесі експерименту почала мутніти, тобто скло поступово розчинялось у воді. З підвищенням вмісту CaO , а особливо P_2O_5 в дослідному склі витрати на титрування 0,01н НСІ збільшуються. Позитивний вплив на дану властивість чинить TiO_2 в дослідній області складів скла.

Емалеві шлікери готували із використанням червоного селенокадмієвого пігменту №1024 в кількості 6 мас.ч. на 100 мас.ч. фрити. Отримані шлікери наносили на заґрунтовані пластини та випалювали при температурі 820 С. Оптико-колірні характеристики отриманих покриттів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Оптико-колірні характеристики покриттів

№	КДВ покриттів без пігменту, %	Колірний тон червоних покриттів, λ , нм	Світлота, L, %	Чистота кольору, P, %	КДЗВ червоних покриттів, %
1	45	625	20	53	60
2	52	≥ 700	19	27	14
3	56	617	24	63	67
4	61	620	21	52	64
5	50	700	17	35	85
6	55	621	21	54	56
7	55	628	21	50	75
8	54	700	19	38	35
9	71	645	20	41	48
10	36	624	20	52	40
11	50	619	18	57	65
12	65	635	19	47	68
13	59	620	22	54	59
14	62	640	19	48	62
15	56	635	20	48	57

Характер ізоліній на графіку КДВ безпігментних покриттів (рис. 3) має доволі складний характер. Можна виділити область складів, що примикають до середини ребра тетраедру $CaO-P_2O_5$, які характеризуються максимальною заглушеністю. Вочевидь, при такому співвідношенні компонентів виділяються фосфати кальцію, які сприяють глушінню емалевого покриття. Склади, які розташовані в області зі збільшеним вмістом TiO_2 , характеризуються стабільними значеннями КДВ в межах 50-60 %.

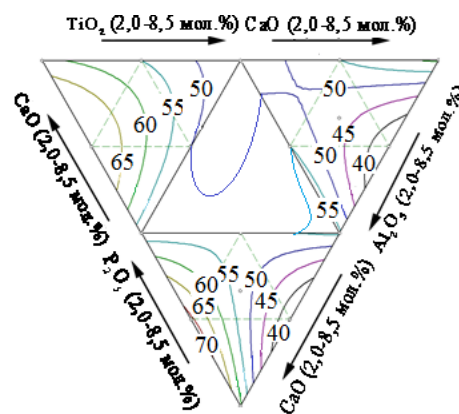


Рис.3 – Залежність КДВ (%) безпігментних покриттів від вмісту дослідних оксидів.

Колірний тон більшості покриттів знаходиться в межах 617–645 нм. Відповідно до характеру ізоліній на симплексі (рис. 4) найбільш активний вплив на колірний тон дослідних покриттів чинить фосфорний ангідрид: зі збільшенням його кількості, збільшується значення λ і наближається до ділянки пурпурних кольорів графіку МКО.

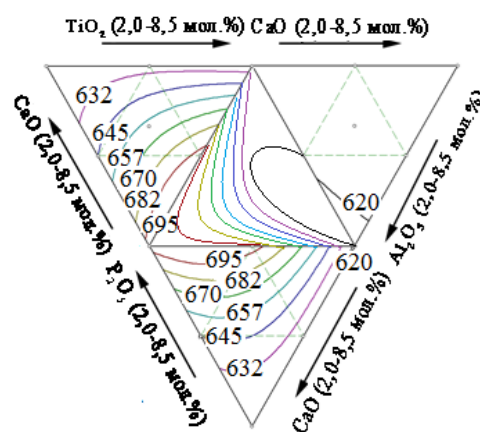


Рис. 4 – Залежність колірного тону (нм) дослідних покриттів від вмісту дослідних оксидів.

Всі склади скла в трикутнику $TiO_2-CaO-Al_2O_3$ характеризуються стабільними значеннями колірного тону, що наближаються до помаранчевої ділянки спектру.

Найбільший вплив на показники світлоти, чистоту кольору і КДЗВ покриттів також чинить P_2O_5 : при максимальному його вмісті поверхня зразків матова та має найменше значення світлоти і чистоти кольору – емаль 2(табл.3).

Відповідно до припущення, висунутого в [4], більшість покриттів за показниками світлоти (близько 20%) і чистоти кольору ($\geq 30\%$) відносяться до типу яскравозабарвлених (табл. 3). Склади, які за планом експерименту примикають до вершини тетраедру з підвищеним вмістом P_2O_5 , як за візуальною оцінкою, так і за визначеними показниками мають менші значення світлоти і чистоти кольору та мають темне забарвлення.

У результаті вивчення впливу на властивості безфтористої емалі компонентів TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , CaO за комплексом властивостей дослідних фрит, покриттів та їх зовнішнім виглядом виявлена область кращих складів №1, 6, 7, 13, 15, яка обмежена наступним співвідношенням компонентів, мол. %: $TiO_2 - 3,63 - 8,5$; $P_2O_5 - 2,0 - 3,63$; $Al_2O_3 - 2,0 - 5,25$; $CaO - 2,0 - 5,25$.

У результаті математичної обробки отриманих експериментальних даних і перевірки значимості коефіцієнтів були складені рівняння регресії (1–6), які адекватно описують залежності «склад склаоснови–властивості».

$$R = 41,2 \cdot x_1 + 17,1 \cdot x_2 + 26,1 \cdot x_3 + 35,4 \cdot x_4 - 17 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,4 \cdot x_1 \cdot x_3 - 13,6 \cdot x_1 \cdot x_4 + 11,6 \cdot x_2 \cdot x_3 - 11,8 \cdot x_2 \cdot x_4 + 17,4 \cdot x_3 \cdot x_4 - 53,7 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 185,7 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 65,1 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 13,2 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 268,4 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (1)$$

$$W = 0,14 \cdot x_1 + 0,85 \cdot x_2 + 0,18 \cdot x_3 + 0,38 \cdot x_4 - 1,54 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,2 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,28 \cdot x_1 \cdot x_4 + 1,42 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,26 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,08 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,38 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 3,12 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 2,4 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 2,19 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 8,36 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (2)$$

$$K_{ДВ} = 45 \cdot x_1 + 52 \cdot x_2 + 56 \cdot x_3 + 51 \cdot x_4 + 6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 18 \cdot x_1 \cdot x_3 + 28 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0 \cdot x_2 \cdot x_3 + 78 \cdot x_2 \cdot x_4 - 70 \cdot x_3 \cdot x_4 - 99 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 87 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 297 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 219 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 1696 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (3)$$

$$K_{ДЗВ} = 60 \cdot x_1 + 14 \cdot x_2 + 67 \cdot x_3 + 64 \cdot x_4 + 192 \cdot x_1 \cdot x_2 - 30 \cdot x_1 \cdot x_3 + 52 \cdot x_1 \cdot x_4 - 22 \cdot x_2 \cdot x_3 + 36 \cdot x_2 \cdot x_4 - 102 \cdot x_3 \cdot x_4 + 66 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 246 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 114 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 633 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 2812 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (4)$$

$$\lambda = 625 \cdot x_1 + 700 \cdot x_2 + 617 \cdot x_3 + 620 \cdot x_4 + 150 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22 \cdot x_1 \cdot x_3 + 166 \cdot x_2 \cdot x_3 - 60 \cdot x_2 \cdot x_4 + 22 \cdot x_3 \cdot x_4 - 1713 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 696 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 150 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 537 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 6176 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (5)$$

$$L = 20 \cdot x_1 + 19 \cdot x_2 + 24 \cdot x_3 + 21 \cdot x_4 - 10 \cdot x_1 \cdot x_2 - 4 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2 \cdot x_1 \cdot x_4 - 10 \cdot x_2 \cdot x_3 - 10 \cdot x_3 \cdot x_4 - 9 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 3 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 45 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 3 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 136 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (6)$$

У теорії обробки експериментальних даних добре відомі методи побудови регресійних моделей з мінімізацією суми квадратів відхилень експериментальних і розрахункових точок і метод лінійного програмування для пошуку оптимального рішення. Об'єднуючи ці методи, пропонується на основі отриманих математичних моделей для різних властивостей побудувати функцію між складом і сумою квадратів відносних відхилень властивостей від заданого цільового комплексу властивостей. Для знаходження оптимального складу необхідно знайти мінімум такої функції.

$$F = \sum_{i=1}^n \left[\frac{y_3 - y_p}{y_3} \right]^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

де n – кількість властивостей;

y_3 – задане значення властивості;

y_p – розрахункове значення властивості.

Сучасні програмні засоби, зокрема програма MathCad® фірми MathSoft, дозволяє досить просто вирішити таке завдання.

Для розрахунку використовуємо математичні моделі (1–6), отримані за експериментальними даними в якості локальної функції.

Задаємо бажані значення властивостей і їх вагові коефіцієнти, які дозволять розділити властивості за значимістю в кінцевому результаті розрахунку.

R	35	$kR:=1$
W	0,13	$kW:=0.1$
$K_{ДВ}$	54	$kK_{ДВ}:=1$
$K_{ДЗВ}$	62	$kK_{ДЗВ}:=1$
λ	626	$k\lambda:=1$
L	21	$kL:=1$

Бажані значення властивостей були визначені як середнє арифметичне значень відповідних властивостей кращих складів №1,6, 7, 13, 15, виділених в результаті експерименту. Функція, яка включає комплекс властивостей має вигляд:

$$F = \left(\frac{R - R(x_1, x_2, x_3, x_4)}{R} \cdot kR \right)^2 + \left(\frac{W - W(x_1, x_2, x_3, x_4)}{W} \cdot kW \right)^2 + \left(\frac{K_{ДВ} - K_{ДВ}(x_1, x_2, x_3, x_4)}{K_{ДВ}} \cdot kK_{ДВ} \right)^2 + \left(\frac{K_{ДЗВ} - K_{ДЗВ}(x_1, x_2, x_3, x_4)}{K_{ДЗВ}} \cdot kK_{ДЗВ} \right)^2 + \left(\frac{\lambda - \lambda(x_1, x_2, x_3, x_4)}{\lambda} \cdot k\lambda \right)^2 + \left(\frac{L - L(x_1, x_2, x_3, x_4)}{L} \cdot kL \right)^2 \quad (8)$$

Задаємо початковий склад в псевдо компонентах та його обмеження:

$$x_1=1 \quad x_2=0 \quad x_3=0 \quad x_4=0$$

$$0 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 1$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$$

На основі літературних даних, вимог стандартів для посудних емалевих фрит для зовнішнього емалювання, обрані межі за розтічністю (35–40 мм) й водостійкістю (витрати на тітування 0,01н HCl: 0–0,2 г/см³ – 1–2 гідролітичний клас). Межі оптико-колірних характеристик задавали з урахуванням порівняння візуальної оцінки і величини вказаних характеристик покриттів, які були отримані в результаті численних досліджень, проведених на кафедрі ХТКС.

$$35 \leq R(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 40$$

$$0 \leq W(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 0.20$$

$$50 \leq K_{ДВ}(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 60$$

$$50 \leq K_{ДЗВ}(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 80$$

$$620 \leq \lambda(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 630$$

$$20 \leq L(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 25$$

За допомогою відомих програмних засобів знаходимо оптимальний склад в мінімумі цільової функції F (8) в псевдокомпонентах:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7372 \\ 0.0298 \\ 0.0385 \\ 0.1945 \end{bmatrix}$$

Переходимо від складу в псевдокомпонентах до реального складу в мол. % :

$$TiO_2(x_1) = 6.792$$

$$P_2O_5(x_2) = 2.194$$

$$Al_2O_3(x_3) = 2.25$$

$$CaO(x_4) = 3.264$$

Прогнозовані властивості емалі для розрахункового оптимального складу за наявними математичними моделями наступні:

$$R(x_1, x_2, x_3, x_4) = 37 \text{ мм}$$

$$W(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,15 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$$

$$\text{КДВ}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 53,081 \%$$

$$\text{КДЗВ}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 69,23 \%$$

$$\lambda(x_1, x_2, x_3, x_4) = 628,06 \text{ нм}$$

$$L(x_1, x_2, x_3, x_4) = 20,435 \%$$

Для перевірки отриманих даних в межах близьких до розрахункового оптимального складу було сплавлено декілька емалей. Склоемаль наступного складу, мол. %: ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) – 85,5; TiO_2 – 6,4; P_2O_5 – 2,1; Al_2O_3 – 2,4; CaO – 3,6 характеризується властивостями: розтічність – 32 мм, водостійкість (витрати 0,01н HCl) – $0,06 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$; оптико-колірними показниками покриттів без пігменту: КДВ – 54 %; з червоним пігментом №1024: λ – 620 нм, L – 19 %, КДЗВ – 59 %. Розроблена безфториста емаль для яскравозабарвлених покриттів пройшла виробничі випробування на ТОВ «Новомосковський посуд» та рекомендована для впровадження в виробництво емалевого посуду.

Висновки. У роботі застосували ряд методів побудови регресійних моделей за рахунок мінімізації суми квадратів відхилень експериментальних і розрахункових точок та лінійного програмування з метою отримання безфтористої склоемалі червоного кольору з покращеним комплексом властивостей для зовнішнього покриття посудних виробів.

Список літератури

1. Голєус В. И. Расчет температурного интервала формирования стеклопокрытий в зависимости от их химического состава / В. И. Голєус, И. А. Маховская, А. В. Носенко // Вопросы химии и химической технологии. -2005.-№3.-С.58-62.
2. Голєус В. И. Расчет поверхностного натяжения расплавов силикатных и боросиликатных стекол / В. И. Голєус, И. А. Маховская // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Технология и применение

- огнеупоров и технической керамики в промышленности».- Харьков:НТУ «ХПИ». – 2005. – С.66-67.
3. Ryzhova, O. Influence of iron oxides on the properties of unfluoridated enamel frit glass and coatings / Olga Ryzhova, Maxim Khokhlov, Victor Goleus and other // Chemistry & Chemical Technology. – 2015. – №3. – P. 343-347.
 4. Хохлов М. А. Розробка економічно ефективних емалевих покриттів для маловуглецевої сталі / М. А. Хохлов, О. П. Рижова // XXV Міжнародна науково-практична конференція «Економіка та сучасні технології». – Чернівці. – 2015. – С. 15-17.
 5. Гулоян Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. – Владимир: Транзит-Икс, 2003. – 480 с.
 6. Брагина Л. Л. Технология эмали и защитных покрытий / Под ред. Л. Л. Брагиной, А. П. Зубехина – Харьков: НТУ ХПИ; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 484 с.

References (transliterated)

1. Goleus V.I., Mahovskaya I.A., Nosenko A.V. *Raschet temperaturnogo intervala formirovaniya steklopokrytiy v zavisimosti ot ih himicheskogo sostava* [The calculation of the temperature interval of the formation of the glass coating, depending on their chemical composition], *Voprosyi himii i himicheskoy tehnologii*. 2005. №3. P. 58-62.
2. Goleus V. I., Mahovskaya I. A. *Raschet poverhnostnogo natyazheniya rasplavov silikatnykh i borosilikatnykh stekol* [The calculation of the surface tension of molten silicate and borosilicate glasses], *Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Tehnologiya i primenenie ogneuporov i tehnicheckoy keramiki v promyshlennosti»*. Harkov:NTU «HPI», 2005, P. 66-67.
3. Ryzhova O., Khokhlov M., Goleus V. *Influence of iron oxides on the properties of unfluoridated enamel frit glass and coatings*: Chemistry & Chemical Technology, 2015, №3, P. 343-347.
4. Khokhlov M., Ryzhova O. *Rozrobka ekonomichno efektyvnykh emalevykh pokryttiv dlia malovuhletsevoi stali* [Development of cost effective enamel coatings for low carbon steel], XXV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Ekonomika ta suchasni tekhnolohii». 2016. P. 15-17.
5. Guloyan Yu. A. *Tehnologiya stekla i stekloizdeliy* [Glass technology and glass products]. Vladimir: Tranzit-Iks Publ., 2003, 460 p.
6. Bragina L. L., Zubezhina A. P. *Tehnologiya emali i zaschitnykh pokrytiy* [Technology and enamel coatings], Harkov: NTU HPI; Novocheerkassk: YuRGU (NPI), 2003, 484 p.

Надійшла (received) 30.06.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахунок складу емалі із заданим комплексом властивостей за допомогою об'єднання різних методів побудови регресійних моделей / О.П. Рижова, М.А. Хохлов, С.Г. Положай // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 22 (1194). – С. 155-160. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0821.

Расчет состава эмали с заданным комплексом свойств с помощью объединения различных методов построения регрессионных моделей / О.П. Рижова, М.А. Хохлов, С.Г. Положай // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 22 (1194). – С. 155-160. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0821.

Combining different methods for constructing regression models by calculation enamel composition with a predetermined set of properties / O.P. Ryzhova, M.A. Khokhlov, S.G. Polozhay // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Chemistry, chemical technology and environment. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. - № 22. – P.155-160. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рижова Ольга Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ; тел.: (0562) 47-36-97; e-mail: olga_ryzhova777@mail.ru.

Рыжова Ольга Петровна – кандидат технических наук, доцент, проректор по научно-педагогической работе ГБУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск; тел.: (0562) 47-36-97; e-mail: olga_ryzhova777@mail.ru.

Ryzhova Olga Petrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Vice-rector for scientific and pedagogical work SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», Dnipropetrovsk; tel.: (0562) 47-36-97; e-mail: olga_ryzhova777@mail.ru.

Хохлов Максим Андрійович – кандидат технічних наук, асистент кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ; тел.: (066) 56-70-396; e-mail: maksim-hohlov1988@mail.ru.

Хохлов Максим Андреевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры процессов, аппаратов и общей химической технологии ГБУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск; тел.: (066) 56-70-396; e-mail: maksim-hohlov1988@mail.ru.

Khokhlov Maksym Andreevich – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), assistant of department of processes, equipment and general chemical technology, SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», tel.: (066) 56-70-396; e-mail: maksim-hohlov1988@mail.ru.

Положай Сергей Григорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри хімічної технології кераміки та скла ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ; тел.: (067) 27-70-213; e-mail: s.polozhaj@mail.ru.

Положай Сергей Григорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры химической технологии керамики и стекла ГБУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск; тел.: (067) 27-70-213; e-mail: s.polozhaj@mail.ru.

Polozhay Sergey Grigorovich – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), senior researcher of department of ceramics and glass, SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», tel.: (067) 27-70-213; e-mail: s.polozhaj@mail.ru.