

*Вітаємо з ювілеєм Заслуженого діяча науки і техніки України, академіка Академії будівництва України, члена-кореспондента Академії технологічних наук, доктора технічних наук, професора Дворкіна Л.Й.*

*Бажаємо зберігати молодість душі, незгасний інтерес до життя, а також міцного здоров'я і довголіття! Нехай всім планам буде призначено збутися, а майбутнє ознаменується ще більш значними досягненнями, приносячи успіх і задоволення від виконаної роботи!*



Дворкін Л.Й.



Дворкін О.Л.



Степасюк Ю.О.

## УДК 666.952

**Дворкін Л. Й., доктор техн. наук, професор,  
Дворкін О. Л., доктор техн. наук, професор,  
Степасюк Ю. О., аспірант,**

**Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна**

# ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ МУРУВАЛЬНИХ РОЗЧИНІВ НА МАЛОКЛІНКЕРНОМУ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ

В статті наведені результати досліджень сухих будівельних сумішей для мурувальних розчинів, в яких у якості вяжучого використаний малоклінкерний шлакопортландцемент. Визначені оптимальні склади і параметри виробництва різних за маркою розчинів.

Енергоємність бетонів і розчинів та їх економічна ефективність у вирішальній мірі залежить від питомої витрати в них портландцементного клінкера. В останній редакції державного стандарту України ДСТУ Б. В. 2.7-46:2010, гармонізованого із європейськими нормами EN 197-1, поряд з двома відомими групами шлакопортландцементу ШПЦ III/A та ШПЦ III/B, з вмістом клінкера відповідно 35-64 % та 20-34 %, передбачено шлакопортландцемент ШПЦ III/B, вміст клінкера в якому складає 5-19 % [3]. Вітчизняне виробництво не має достатнього досвіду виробництва малоклінкерних шлакопортландцементів (МШПЦ). Застосування цементів з високим вмістом активних мінеральних добавок в тому числі і МШПЦ перспективно у виробництві сухих будівельних сумішей в композиції з необхідними добавками-модифікаторами [1, 2].

Метою роботи, результати якої наведені в даній статті, було дослідити комплексний вплив на властивості мурувальних розчинів на основі сухих будівельних сумішей, виготовлених із застосуванням МШПЦ, витрати цементу, вапна та добавки суперпластифікатора при заданій рухомості розчинової суміші.

В якості сировинних матеріалів для проведення експериментальних досліджень було використано шлакопортландцемент наступного складу: клінкер – 12 %, доменний гранульо-

ваний шлак – 88 %, фосфогіпс-дигідрат – 7,5 % ( в перерахунку на SO<sub>3</sub> – 4,5 %). Хімічний склад матеріалів наведений в табл. 1. Активність вяжучого з питомою поверхнею 550 м<sup>2</sup>/кг складала 43 МПа. В якості пластифікуючої добавки було використано лінгосульфат технічний (ЛСТ). Як дрібний заповнювач використовували кварцевий пісок Славутського родовища з максимальною крупністю зерна 1,25 мм.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований тривірневий трифакторний план В<sub>3</sub> [5]. Умови планування експерименту наведені в табл. 2. Всі зразки розчинової суміші виготовлялися з однаковою рухомістю 4-8 см, що відповідає марці П8 [6].

Після проведення, обробки і статистичного аналізу експериментальних даних розраховані моделі водопотреби та терміну придатності розчинової суміші, а також міцності на стиск розчину у вигляді поліноміальних рівнянь регресії.

Графічні залежності, отримані аналізом моделей, які ілюструють вплив технологічних факторів на водопотребу розчинової суміші та міцність розчину на стиск у 28 діб, представлені на рис. 1, 2, 3.

З них випливає, що збільшення витрати цементу в варі-

Таблиця 1.

Хімічний склад вихідних матеріалів

Вид матеріалів	Вміст оксидів, мас. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Доменний гранульований шлак	39,52	6,49	0,12	47,13	3,10	1,74	1,15	-
Фосфогіпс	-	0,36	0,15	38,4	0,003	59,7	-	0,67
Клінкер	22,47	5,26	4,07	66,18	0,64	0,46	0,29	-

Таблиця 2.

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X <sub>1</sub>	Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup> (Ц)	200	300	400	100
2	X <sub>2</sub>	Витрата пластифікуючої добавки, кг/м <sup>3</sup> (Д)	1	1,5	2	0,5
3	X <sub>3</sub>	Витрата вапна, кг/м <sup>3</sup> (Вп)	10	25	40	15

Експериментально-статистичні моделі водопотреби,  
терміну придатності та міцності бетонів на малоклінкерному шлакопортландцементі

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водопотреба розчинової суміші, л/м <sup>3</sup>	$V=145,2+6,4X_1-6,02X_2+7,9X_3+6,6X_1^2+0,4X_2^2+0,3X_3^2+0,46X_1X_2+4,6X_1X_3+0,7X_2X_3;$ (1)
Терміни придатності розчинової суміші, хв	$\tau=179,5-46,2X_1-0,1X_2+14,8X_3+7,2X_1^2-1,3X_2^2-1,8X_3^2-0,1X_1X_2-3,9X_1X_3+3,4X_2X_3;$ (2)
Міцність розчину на стиск у віці 7 діб, МПа	$R_{ст7}=6,33+1,9X_1+1,0X_2-1,49X_3+1,9X_1^2+0,5X_2^2+0,8X_3^2-1,7X_1X_2-0,8X_1X_3-0,06X_2X_3;$ (3)
Міцність розчину на стиск у віці 28 діб, МПа	$R_{ст28}=12,6 +6X_1+2,7X_2-1,2X_3+3,1X_1^2+0,3X_2^2-0,01X_3^2+1,1X_1X_2+0,04X_1X_3-0,26X_2X_3;$ (4)

Примітка: в рівняннях (1-4)  $X_1 = \frac{(C-300)}{100}$ ;  $X_2 = \frac{(D-1,5)}{0,5}$ ;  $X_3 = \frac{(B_n-25)}{15}$ ,

йованих межах призводить до деякого збільшення водопотреби розчину, проте даний вплив є несуттєвим. Це дає підстави вважати, що в розчинах на МШПЦ, так само як і в бетонах, діє відоме правило постійності водопотреби [6]. Суттєвий вплив на водопотребу справляє збільшення витрати «вапна-пушонки», збільшення вмісту якого до 40 кг/м<sup>3</sup> призводить до збільшення водопотреби суміші

більш ніж в 1,5 рази. Проте знівелювати даний вплив можна збільшенням вмісту пластифікуючої добавки ЛСТ, що дозволяє зменшити кількість води необхідну для отримання високопластичного розчину з заданою рухомістю і, відповідно, збільшити його кінцеву міцність. Вплив даних двох факторів на водопотребу розчину є найбільш суттєвим і він носить практично лінійний характер (рис.1).

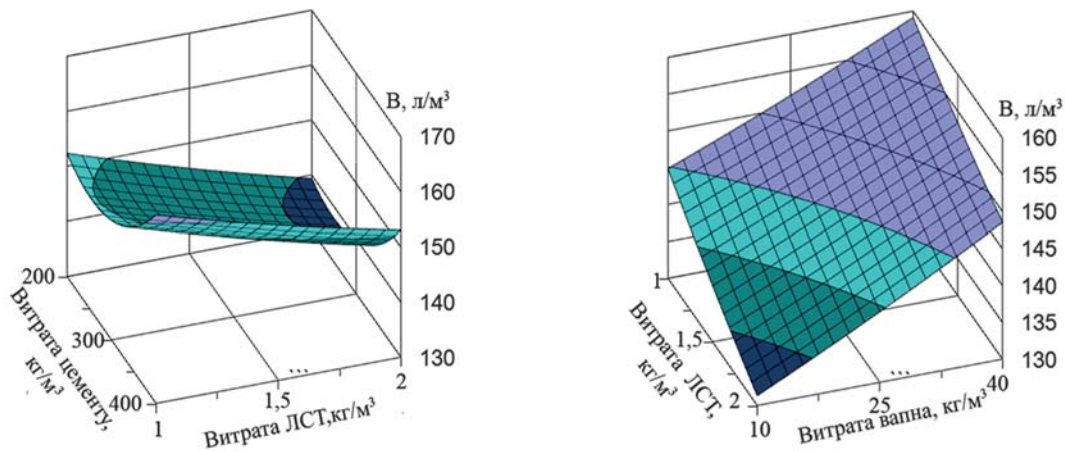


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на водопотребу мурувального розчину

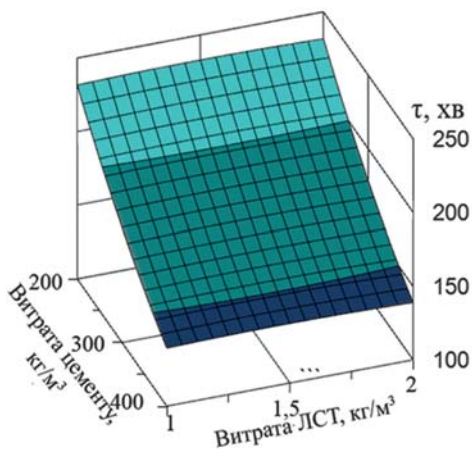


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на термін придатності мурувального розчину

Тверднення малоклінкерних цементів проходить в результаті сумісного впливу процесів гідратації клінкерної складової і реакції хімічної взаємодії гідратних новоутворень з активними компонентами мінеральних добавок. Разом з тим, введення мінеральних добавок до цементу супроводжується сповільненням раннього структуроутворення, що спричиняє уповільнення термінів тужавіння і відповідно подовження термінів придатності розчинів. Аналіз експериментально-статистичної моделі (2) (рис. 2) дозволяє зробити висновок, що найбільш суттєвий вплив на терміни придатності («живучості») розчинів, виготовлених на малоклінкерному шлакопортландцементі, має витрата в'язучого, при збільшенні якої від 200 до 400 кг/м<sup>3</sup>, можливий час використання розчину знижується майже в двічі. Це пов'язано із збільшенням кількості активної складової розчину. До деякого збільшення терміну придатності мурувальних розчинів, виготовлених на МШПЦ призводить збільшення вмісту гідратного вапна, а також вмісту пластифікуючої добавки ЛСТ.

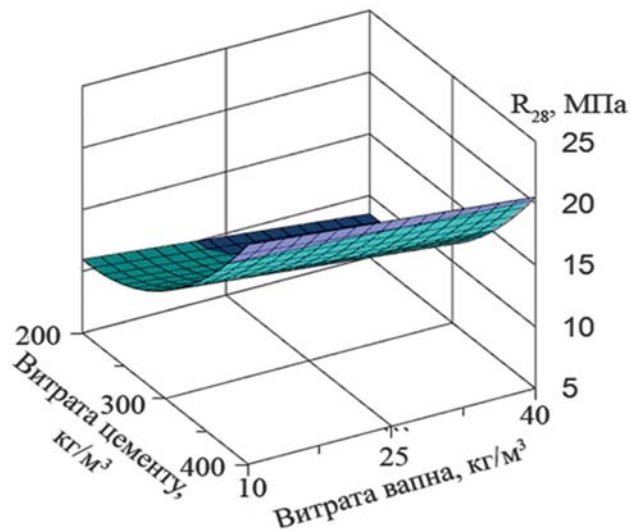
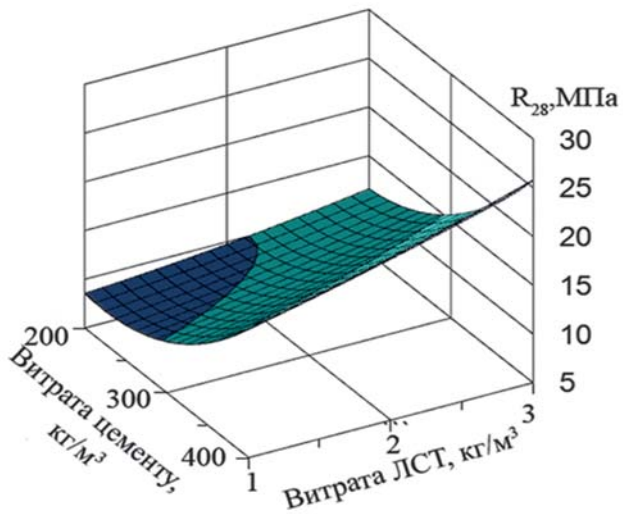


Рис. 3. Вплив технологічних факторів на міцність мурувального розчину у віці 28 діб

До зростання марочної міцності мурувальних розчинів, виготовлених на малоклінкерному шлакопортландцементі, призводить збільшення витрати в'язучого та пластифікуючої добавки ЛСТ, що основним чином пов'язано із зменшенням водо-цементного відношення (рис. 3). В діапазоні складів сумішей, що визначаються областю варіювання основних факторів їх складу (табл. 2), можна отримати розчини з міцністю на стиск від 5 до 23 МПа. Негативно на міцність мурувальних розчинів впливає збільшення кількості «вапна-пушонки», що основним чином пов'язано із збільшенням кількості води необхідної для отримання розчинів з заданою рухомістю.

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі (4) (табл. 3) побудовано номограму міцності мурувальних розчинів на основі сухих сумішей виготовлених на МШПЦ. Дана номограма дозволяє прогнозувати міцність розчинів при заданому компонентному складі або визначити витрату одного із компонентів при заданому вмісті інших. Вона в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 3) може бути використана також для проектування складів розчинів з мінімальною вартістю та комплексом заданих властивостей.

Приклад. Розрахувати склад сухої будівельної суміші для мурувальних розчинів, який забезпечує при мінімальній вартості міцність у віці 28 діб  $R_{ct}^{28} = 15$  МПа при міцності у віці 7 діб  $R_{ct}^7 \geq 5$  МПа з терміном придатності  $t \geq 145$  хв.

Відомо, що вартість цементу, добавок «вапна-пушонки» та ЛСТ, які витрачаються на  $1 \text{ м}^3$  сухої суміші, набагато перевищує вартість заповнювачів. Отже мінімізація вартості суміші фактично означає мінімізацію вартості в'язучого Св'яз, до якого умовно зараховуємо не тільки вапно, але і пластифікатор :

$$C_{в'яз} = C_{ц} \cdot Ц + C_{лст} \cdot ЛСТ + C_{вп} \cdot Вп \quad (5)$$

де  $C_{ц}$ ,  $C_{лст}$ ,  $C_{вп}$  – відповідно вартість цементу, пластифікатора та вапна, грн/кг;

$Ц$ ,  $ЛСТ$ ,  $Вп$  – відповідно витрата цементу, пластифікатора та вапна,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

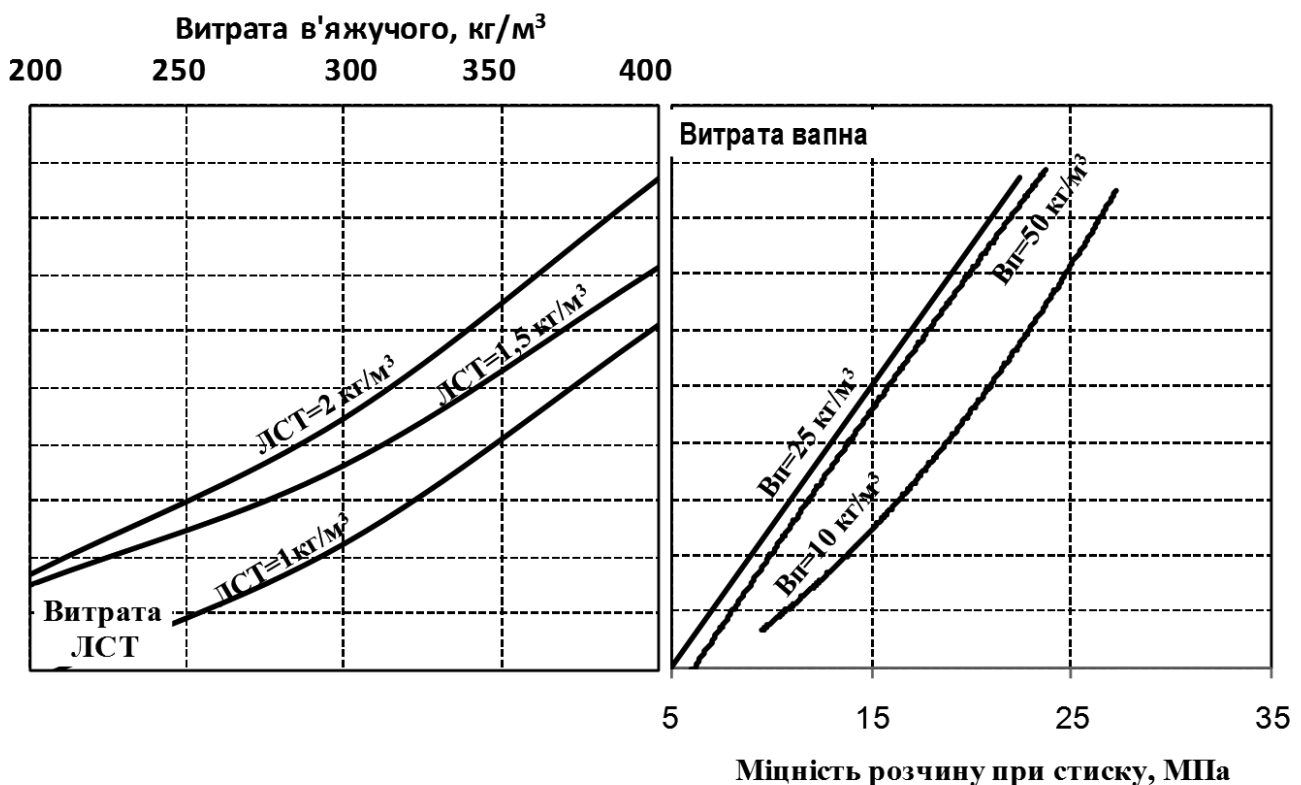


Рис. 4 Номограма міцності мурувальних розчинів виготовлених на малоклінкерному ШПЦ

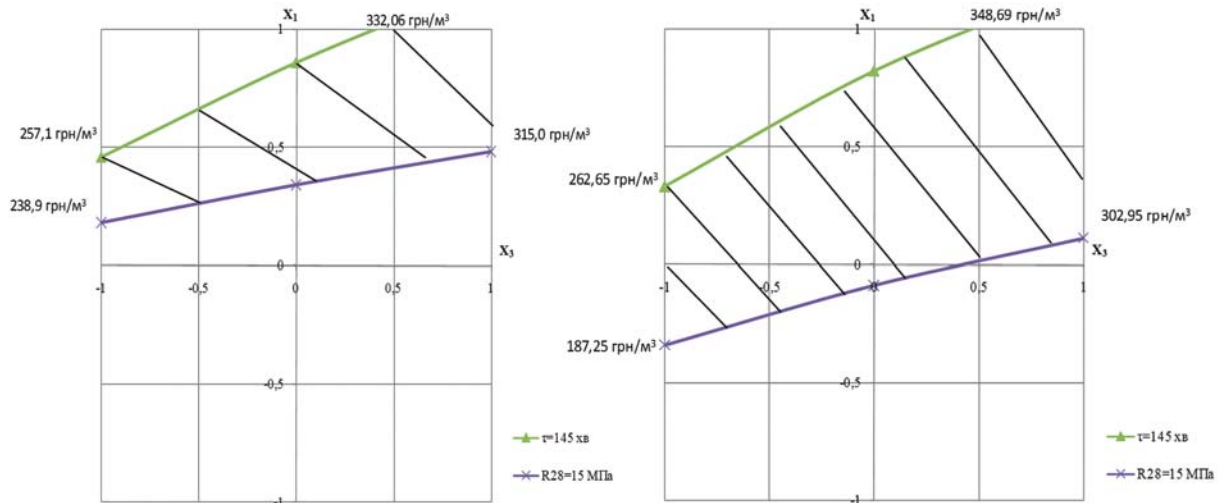


Рис. 5 Графічний метод пошуку допустимої області рішень задачі при а)  $X_2 = 0$ , б)  $X_2 = 1$

За умови забезпечення необхідного терміну придатності та міцності розчину на стиск у віці 7 та 28 діб:

$$\tau \geq f_1(X_1, X_2, X_3), \quad (6)$$

$$R_{ct}^{28} = f_2(X_1, X_2, X_3) \quad (7)$$

$$R_{ct}^7 \geq f_3(X_1, X_2, X_3) \quad (8)$$

Методика розрахунку оптимальних за вартістю складів сухих будівельних сумішей із застосуванням поліноміальних моделей та методу лінійного програмування може полягати в наступному:

1. Функції обмежень (6) та (7) при  $\tau = 145$  хв та  $R_{ct}^{28} = 15$  МПа матимуть наступний вигляд:

$$145 = 179,5 - 46,2X_1 - 0,1X_2 + 14,8X_3 + 7,2X_1^2 - 1,3X_2^2 - 1,8X_3^2 - 0,1X_1X_2 - 3,9X_1X_3 + 3,4X_2X_3;$$

$$15 = 12,6 + 6X_1 + 2,7X_2 - 1,2X_3 + 3,1X_1^2 + 0,3X_2^2 - 0,01X_3^2 + 1,1X_1X_2 + 0,04X_1X_3 - 0,26X_2X_3;$$

2. Стабілізуємо значення фактора  $x_2$ : а) на середньому рівні (ЛСТ=1,5 кг/м<sup>3</sup>); б) на максимальному рівні (ЛСТ=2 кг/м<sup>3</sup>). Тоді вищенаведені рівняння перепишемо у вигляді:

$$\text{а) } 34,5 - 46,2X_1 + 14,8X_3 + 7,2X_1^2 - 1,8X_3^2 - 3,9X_1X_3 = 0;$$

$$33,1 - 46,2X_1 + 18,2X_3 + 7,2X_1^2 - 1,8X_3^2 - 3,9X_1X_3 = 0;$$

$$\text{б) } -2,4 + 6X_1 - 1,2X_3 + 3,1X_1^2 - 0,01X_3^2 + 0,04X_1X_3 = 0; 0,6 + 7,1X_1 - 1,44X_3 + 3,1X_1^2 - 0,01X_3^2 + 0,04X_1X_3 = 0;$$

3. Будуємо ізолінії  $\tau$  та  $R_{ct}^{28}$  в залежності від факторів  $x_1$  та  $x_3$  та визначаємо область можливих варіантів рішень

### Висновки

Дослідження показали можливість отримання високоякісних будівельних розчинів для мурувальних робіт, використовуючи в якості в'язучого малоклінкерний шлакопортландцемент (МШПЦ). За результатами досліджень були отримані еспериментально-статистичні моделі водопотреби, терміну придатності та міцності. Побудовано номограму міцності мурувальних розчинів виготовлених на МШПЦ, яка дозволяє прогнозувати міцність при заданому компонентному складі або визначати витрату одного із компонентів при заданому вмісті інших. На основі отриманих моделей та відомої вартості вихідних матеріалів показано можливість мінімізувати вартість сухих будівельних сумішей для мурувальних розчинів при заданих нормованих значеннях їх властивостей.

### Література:

1. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів: Підручник. – Видавництво КНУБіА, 2007. – 256.
2. Захарченко П.В., Долгий Е.М., Галаган Ю.О., Гавриш О.М., Гулін Д.В., Старченко О.Ю. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали: Підручник. – Видавництво КНУБіА, 2005. – 512 с.
3. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: Підручник. – К.: Основа, 2012.
4. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О., Мохорт М.А., Безсмертний М.П. Використання техногенних продуктів у будівництві. – Рівне: НУВГП, 2009.

(заштрихована ділянка рис. 5).

4. За формулою (5) знаходимо вартість в'язучого в точках на границі експерименту. Приймаючи  $C_{ц} = 0,65$  грн/кг,  $C_{лст} = 14$  грн/кг,  $C_{вп} = 1,82$  грн/кг розраховуємо вартість в'язучого в точках на перетині границі області можливих рішень та області значень факторів  $x_1$  та  $x_3$  (рис. 5). Як видно з рисунка, мінімальна вартість в'язучого буде в точці на границі допустимої області з координатами  $(-0,34; -1)$ , яка належить лінії рівня функції  $R_{ct}^{28}$  (рис 5б). Також з рис.5 видно, що зменшення витрати пластифікуючої добавки ЛСТ від 2 до 1,5 кг/м<sup>3</sup> тягне за собою збільшення витрати в'язучого від 266 кг/м<sup>3</sup> до 318 кг/м<sup>3</sup> і відповідне збільшення вартості сухої суміші на 51,65 грн/м<sup>3</sup>.

5. Підставляємо отримані значення факторів  $x_1 = -0,34$ ,  $x_2 = 1$ ,  $x_3 = -1$  в рівняння 3 табл. 3 та перевіряємо чи виконується умова  $R_{ct}^7 \geq 5$  МПа. В результаті отримуємо:

$$R_{ct}^7 = 9,9 \text{ МПа} \geq 5 \text{ МПа} - \text{умова виконується.}$$

Отже, для досягнення міцності на стиск у віці 7 і 28 діб відповідно  $R_{ct}^7 \geq 5$  МПа та  $R_{ct}^{28} = 15$  МПа, а також терміну придатності  $\tau = 145$  хв мінімальна вартість в'язучого забезпечуватиметься при витраті малоклінкерного ШПЦ 266 кг/м<sup>3</sup>, витраті ЛСТ 2 кг/м<sup>3</sup> та витраті «вапна-пушонки» 10 кг/м<sup>3</sup>.