

С.Й. Солодкий, Р.М. Русин, С.І. Томецька*
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автомобільних шляхів,
*кафедра вищої математики

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕТОНУ ДЛЯ ВИРОБІВ ДОРОЖНЬОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЦЕМЕНТІВ

© Солодкий С.Й., Русин Р.М., Томецька С.І., 2004

На основі розв’язання задачі нелінійного програмування оптимізовані рецептурно-технологічні параметри бетону, який використовується для виготовлення бетонних і залізобетонних виробів у заводських умовах за критерієм міцності. Показники міцності бетону визначаються після тепловологісної обробки у віці 2 і 28 діб.

On the basis of decision of task of the nonlinear programming the optimized compounding-technological parameters of concrete which is used for making of concrete and reinforced concrete wares in factory terms after the criterion of durability. The indexes of durability of concrete are determined after thermal-humidity treatment in age 2 and 28 days.

Вступ. У попередніх роботах [1, 2] наведено постановку та реалізацію факторного експерименту в технології бетонів на основі модифікованих композиційних цементів (МКЦ), а також оптимізація рецептурно-технологічних параметрів бетону для влаштування монолітних шарів дорожнього одягу. Використано МКЦ двох систем: “портландцементний клінкер – доменний гранульований шлак – перліт” (КЦ-1) і “портландцементний клінкер – доменний гранульований шлак – зола-виносу ТЕС” (КЦ-2). Як фактори впливу при плануванні експерименту прийнято витрату активатора – солі лужного металу Na_2SO_4 , кількість пластифікатора *Addiment BV3* (Addiment, Німеччина) і коефіцієнт розсунення зерен щебеню бетонної суміші. Досліджуваними характеристиками були границі міцності бетону на розтяг при згині та стиск і показник легковкладальності – осадка конуса бетонних сумішей (ОК).

Внаслідок проведення регресивного аналізу експериментальних даних отримано рівняння регресії у вигляді поліномів другого та третього порядку, що описують характер зміни досліджуваних характеристик залежно від значень вибраних факторів. Статистична обробка отриманих рівнянь показала їх адекватність у вибраному факторному просторі при 95 %-й довірчій ймовірності.

Запропоновані математичні моделі досліджуваних характеристик дозволяють отримати бетони з необхідними характеристиками міцності та реологічними властивостями бетонної суміші. Це досягається шляхом задання значень рецептурно-технологічних параметрів, а саме: складу КЦ, коефіцієнта розсунення, витрати сульфату натрію, вмісту пластифікатора та умов тверднення бетону.

Виконані дослідження є основою для оптимізації рецептурно-технологічних параметрів бетону, який піддається тепловологісній обробці і використовується для виготовлення бетонних (тротуарна плитка, фігурні елементи брукування) і залізобетонних виробів (плити для покриття вулиць і доріг, лотки, бортове каміння, елементи дорожніх огорожень тощо) в заводських умовах.

Формулювання задачі оптимізації та отримані результати. Задачу оптимізації сформульовано як задачу пошуку оптимальних рецептурно-технологічних параметрів із урахуванням умов укладання бетонних сумішей та напружено-деформованого стану бетонів у конструкції. Математичну модель такої задачі подано у формі задачі нелінійного програмування як сукупність вектора змінних проектування, системи обмежень і критерію оптимальності.

Змінними проектування приймемо вибрані фактори впливу у кодованому вигляді

$$\bar{X}' = (X'_1, X'_2, X'_3), \quad (1)$$

де X'_1, X'_2, X'_3 – відповідно значення витрати активатора, кількості пластифікатора і коефіцієнта розсушення у кодованому вигляді. Фактичні значення факторів $\bar{X} = (X_1, X_2, X_3)$ пов'язані з кодованими співвідношенням

$$X_i = \frac{X'_i(X_i^U - X_i^L) + (X_i^U + X_i^L)}{2}, \quad (2)$$

де X_i^L і X_i^U – фактичні значення нижньої та верхньої межі варіювання значень змінних проектування (табл. 1).

Таблиця 1

Змінні проектування задачі оптимізації

№ з/п	Змінна X_i	Межі варіювання значень змінної			
		нижня		верхня	
		кодовані X_i^L	фактичні X_i^L	кодовані X_i^U	фактичні X_i^U
1	X_1	-1	4	+1	8
2	X_2	-1	0	+1	1
3	X_3	-1	1.1	+1	1.9

Під час вибору критеріїв оптимізації взято до уваги той факт, що насамперед до бетону ставляться вимоги з міцності на стиск. Так, при виготовленні плит для покриття міських доріг необхідно використовувати бетон класів В 22,5 і В 30 [5], для тротуарних плит – бетон класів В 22,5–35 [6]. Тому критерієм оптимізації рецептурно-технологічних параметрів пропареного бетону для бетонних і залізобетонних виробів дорожньої номенклатури прийнято межу міцності бетону на стиск

$$R_{cm}(\bar{X}') \rightarrow \max, \quad (3)$$

де $R_{cm}(\bar{X}')$ – рівняння регресії у вигляді полінома другого порядку для міцності бетону на стиск у віці 28 діб після ТВО, МПа [1].

Технічними умовами на виробі регламентується також мінімально допустимий клас міцності бетону на розтяг при згині, який для бетону плит покриттів становить $B_{ib}4,0$, для тротуарної плитки – $B_{ib}3,2-4,4$. У результаті аналізу експериментальних значень міцності бетону на розтяг під час згину прийнята нижня межа міцності R_{32}^L для бетону на КЦ-1 – $R_{32,1}^L = 6,5$ МПа, КЦ-2 – $R_{32,2}^L = 7,0$ МПа:

$$R_{32}(\bar{X}') \geq R_{32}^L, \quad (4)$$

де $R_{32}(\bar{X}')$ – рівняння регресії у вигляді поліномів другого порядку для міцності бетону на розтяг під час згину у віці 28 діб, МПа [1].

Оскільки виробі формуються в умовах заводу, доцільне застосування жорстких бетонних сумішей. Це зумовлює вибір мінімальних із можливих експериментальних значень осадки конуса бетонних сумішей, що відповідає марці за легкоукладальністю Р1. З огляду на це прийнято нижню OK^L і верхню OK^U межі ОК для сумішей на основі цих цементів відповідно 1 і 4 см.

$$OK^L \leq OK(\bar{X}) \leq OK^U,$$

де $OK(\bar{X})$ – рівняння регресії у вигляді поліномів третього порядку, що описують осадку конуса, см [1].

Окрім того, ефективні засоби ущільнення дозволяють використовувати жорсткі суміші із структурою, для якої характерний контакт між крупними заповнювачами і значення коефіцієнта розсунення в діапазоні 1,1–1,4.

$$1.1 \leq X_3 \leq 1.4$$

або

$$-1.0 \leq X'_3 \leq -0.25.$$

Зауважимо, що регресії $R_{3z}(\bar{X}')$, $R_{cm}(\bar{X}')$, $OK(\bar{X})$ для КЦ-1 і для КЦ-2 отримані для факторного простору **D**, який окреслюється обмеженнями на межі зміни значень змінних проектування (табл. 1):

$$\bar{X}'^L \leq \bar{X}' \leq \bar{X}'^U. \quad (5)$$

У випадках, коли функції критерію та обмежень є неперервно диференційованими, що характерно для поліноміальних залежностей, часто надається перевага локально-градієнтним методам пошуку оптимального рішення [4]. У табл. 2 зображено математичну модель задачі оптимізації рецептурно-технологічних параметрів бетону, сформульовану при орієнтації на градієнтний метод її розв'язання.

Таблиця 2

Математична модель задачі оптимізації рецептурно-технологічних параметрів

Бетон на основі	
КЦ-1	КЦ-2
Змінні проектування:	
$\bar{X}' = (X'_1, X'_2, X'_3)$	
Критерій оптимальності:	
$R_{cm,1}(\bar{X}') \rightarrow \max,$	$R_{cm,2}(\bar{X}') \rightarrow \max,$
Система обмежень:	
$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= 1 + X'_1 \leq 0, \\ \varphi_2 &= X'_1 - 1 \leq 0, \\ \varphi_3 &= 1 + X'_2 \leq 0, \\ \varphi_4 &= X'_2 - 1 \leq 0, \\ \varphi_5 &= 1 + X'_3 \leq 0, \\ \varphi_6 &= -\frac{X'_3}{0.25} - 1 \leq 0, \\ \varphi_7 &= 1 - \frac{OK_1(\bar{X})}{1.0} \leq 0, \\ \varphi_8 &= \frac{OK_1(\bar{X})}{4.0} - 1 \leq 0, \\ \varphi_9 &= 1 - \frac{R_{3z,1}(\bar{X}')}{6.5} \leq 0 \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= 1 + X'_1 \leq 0, \\ \varphi_2 &= X'_1 - 1 \leq 0, \\ \varphi_3 &= 1 + X'_2 \leq 0, \\ \varphi_4 &= X'_2 - 1 \leq 0, \\ \varphi_5 &= 1 - \frac{X'_3}{0.25} \leq 0, \\ \varphi_6 &= X'_3 - 1 \leq 0, \\ \varphi_7 &= 1 - \frac{OK_2(\bar{X})}{1.0} \leq 0, \\ \varphi_8 &= \frac{OK_2(\bar{X})}{4.0} - 1 \leq 0, \\ \varphi_9 &= 1 - \frac{R_{3z,2}(\bar{X}')}{7.0} \leq 0. \end{aligned} \right\}$

Задачі оптимізації рецептурно-технологічних параметрів бетону на основі МКЦ (табл. 2) розв'язано градієнтним методом з використанням програмного забезпечення OptCAD* [3]. Результати оптимізації зведено в табл. 3.

* Програма доступна в мережі Internet на сторінці www.optimisation.com.ua.

Результати оптимізації рецептурно-технологічних параметрів бетону на основі МКЦ

Результати	Оптимальні значення змінних проектування для бетону на			
	КЦ-1		КЦ-2	
	кодовані	фактичні	кодовані	фактичні
X_1^{opt}	-0.72	4,56	-0.81	4,38
X_2^{opt}	1	1,0	1	1,0
X_3^{opt}	-1	1,1	-1	1,1
Значення критерію оптимальності, МПа	43,16 (B30)		49,31 (B35)	
Номери активних обмежень:	4, 5		4, 6, 7	

Зупинення в ітеративному процесі пошуку оптимального проектного вирішення досягнуто через те, що приріст значення функції мети на двох послідовних кроках наближення становив менше $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-4}$ за відсутності порушених обмежень (нев'язки в активних обмеженнях не перевищували $\varepsilon_2 = 1 \times 10^{-6}$). Досягнення глобального оптимуму підтверджено збіжністю алгоритму в одній точці при різних початкових наближеннях.

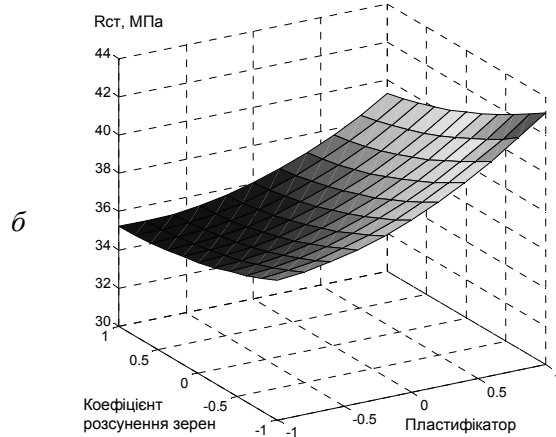
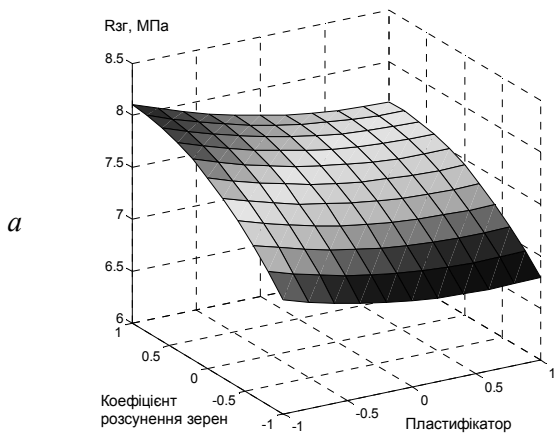
Отримані рівняння регресії [1] доцільно проілюструвати поверхнями відгуку досліджуваних характеристик із використанням наведених результатів оптимізації (табл. 3). На рис. 1–3 побудовано поверхні відгуку міцності бетону на розтяг під час згину та стиск і осадки конуса бетонної суміші. Такі поверхні відгуку дають змогу оцінити якісний та кількісний вплив рецептурно-технологічних параметрів на досліджувані характеристики.

Аналіз впливу рецептурно-технологічних параметрів на досліджувані характеристики бетонів. 1. Витрата сульфату натрію. Витрата Na_2SO_4 суттєво впливає на міцність R_{cm} (рис. 1.2, б, 1.3, б, 2.2, б, 2.3, б), при цьому, вплив даного фактора для бетону на КЦ-1 є значущішим. У вибраному факторному просторі залежності міцності R_{cm} від витрати Na_2SO_4 є квадратичними у вигляді парабол з опущеними вітками. Вершини парабол суміщені в інтервал значень фактору $X_1 \in [4, 6]$. Такий характер поверхонь узгоджується з отриманими оптимальними значеннями витрати Na_2SO_4 , наведеними в табл. 3.

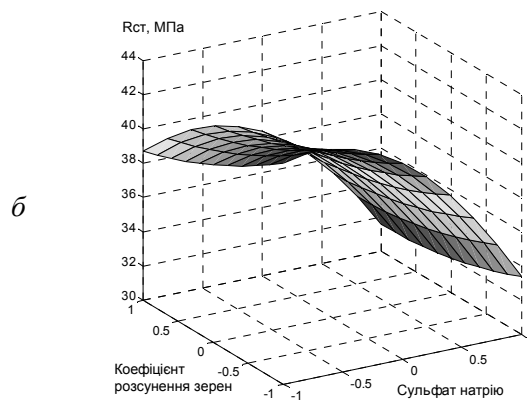
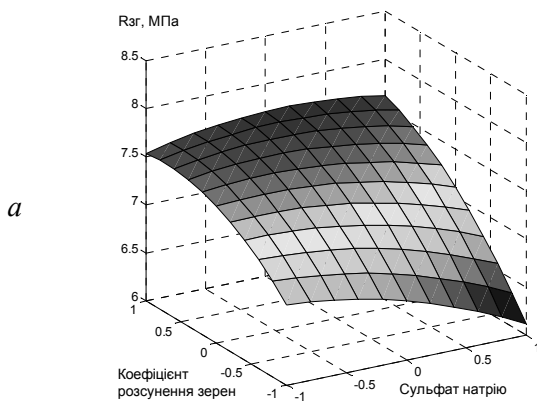
Залежності міцності R_{32} від витрати Na_2SO_4 мають аналогічний характер (рис. 1.2, а, 1.3, а і 2.2, а, 2.3, а), причому, для бетону на КЦ-2 простежуються яскраво виражені екстремуми функцій таких залежностей (рис. 2.2, а, 2.3, а). Вплив цього фактора на міцність R_{32} бетону на КЦ-2 є найзначущішим (рис. 2.2, а, 2.3, а).

Вплив витрати Na_2SO_4 на рухливість бетонних сумішей на КЦ-1 є незначним. Збільшення кількості активатора від 4 до 8 % спричинює невелике зростання рухливості суміші за залежністю, близькою до лінійної (рис. 3.2, а, 3.3, а). Найбільше значення ОК спостерігається при максимальній витраті Na_2SO_4 .

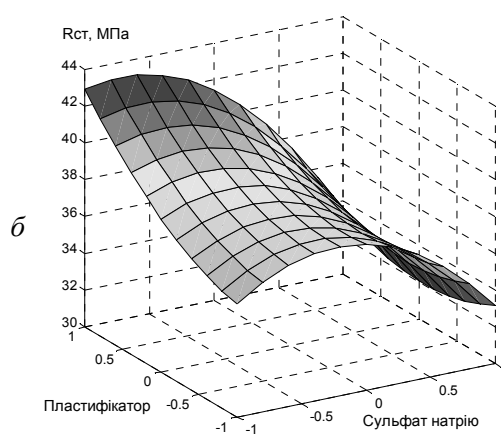
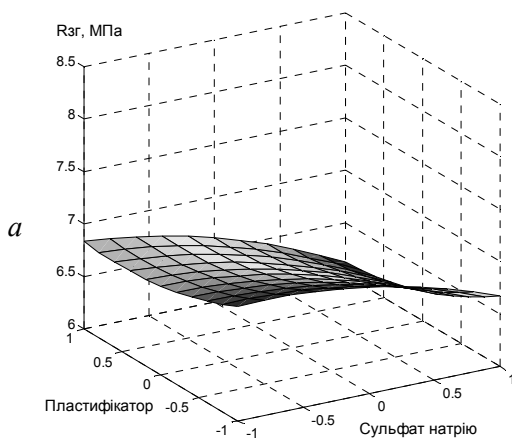
Для бетону на КЦ-2 ОК нелінійно зростає до максимального значення вмісту активатора (рис. 3.2, б). Тому Na_2SO_4 можна розглядати як слабкий пластифікатор бетонної суміші. Зазначимо, що вплив вмісту Na_2SO_4 на рухливість бетонної суміші значно збільшується зі зростанням кількості пластифікатора (рис. 3.3, б) та збільшення коефіцієнта розсунення (рис. 3.2, б).



1.1. Під час дискретизації витрати Na_2SO_4 на рівні $X_1^{opt} = 4.56\%(-0.72)$

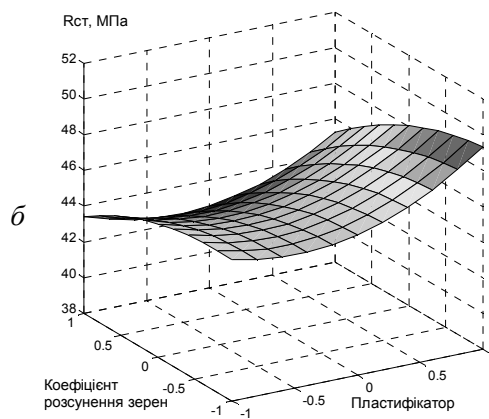
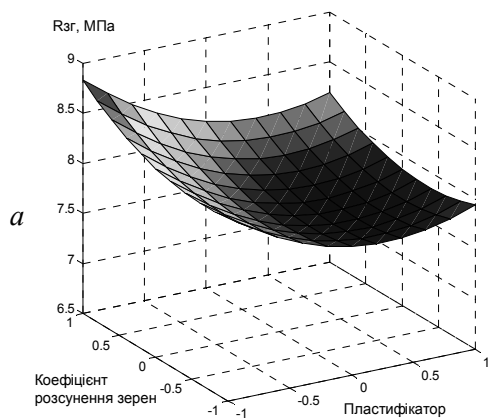


1.2. Під час дискретизації кількості пластифікатора на рівні $X_2^{opt} = 1\%(+1)$

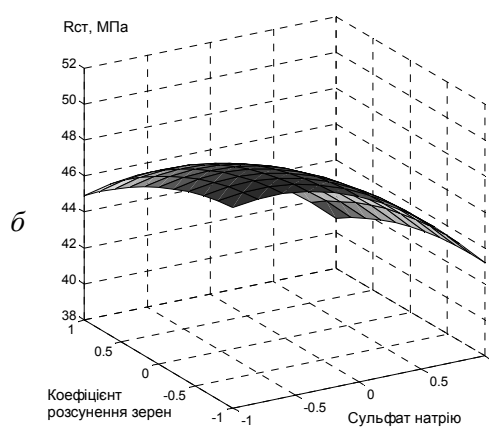
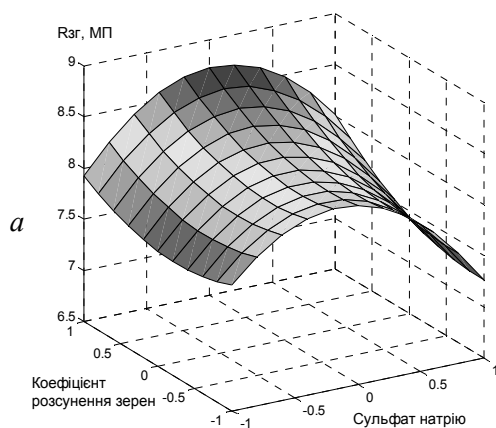


1.3. Під час дискретизації коефіцієнта розсунення щебеню на рівні $X_3^{opt} = 1.1(-1)$

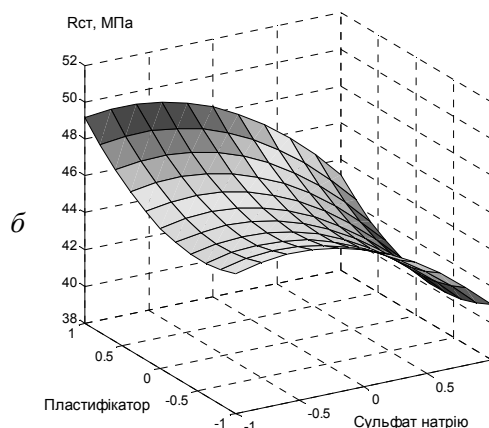
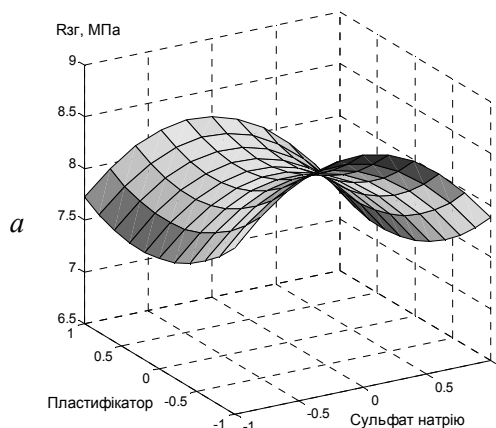
Рис. 1. Поверхні відгуку досліджуваних характеристик бетону на КЦ-1



2.1. Під час дискретизації витрати Na_2SO_4 на рівні $X_1^{opt} = 4.38\%(-0.81)$

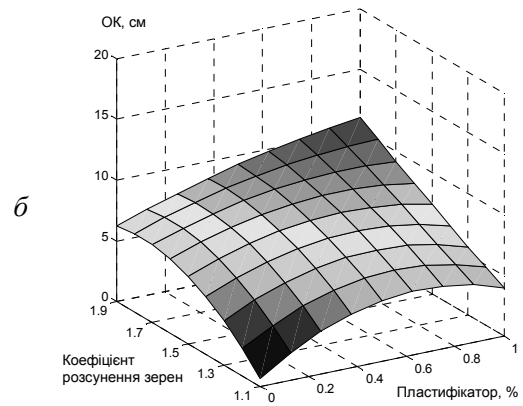
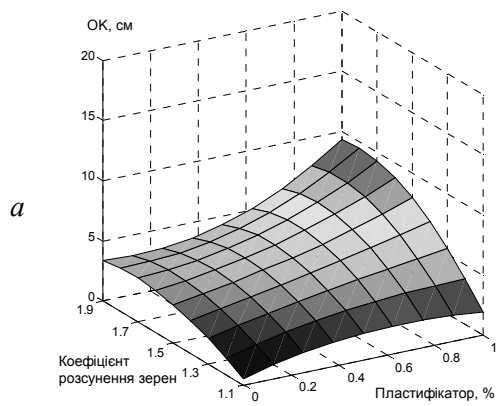


2.2. Під час дискретизації кількості пластифікатора на рівні $X_2^{opt} = 1\%(+1)$

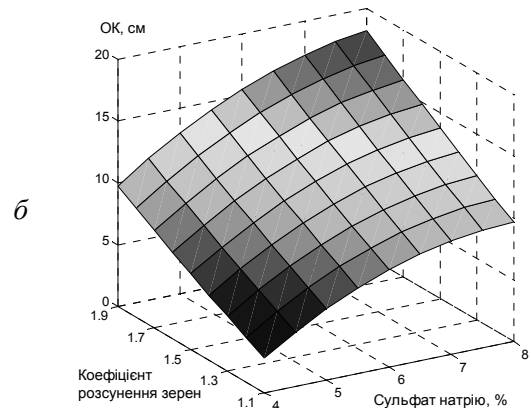
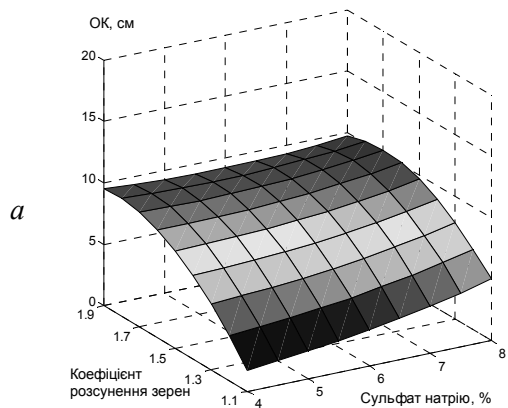


2.3. Під час дискретизації коефіцієнта розсунення щебеню на рівні $X_3^{opt} = 1.1(-1)$

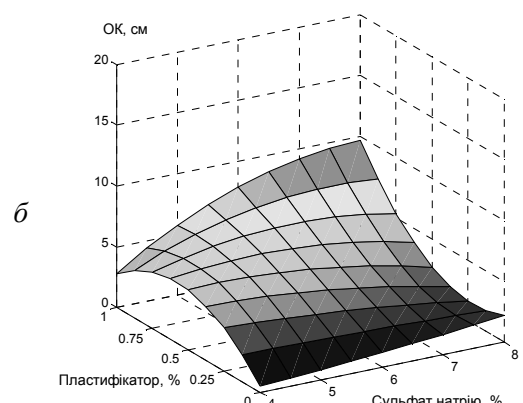
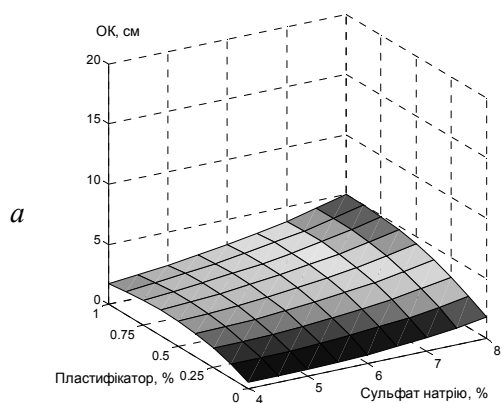
Рис. 2. Поверхні відгуку досліджуваних характеристик бетону на КЦ-2



3.1. Під час дискретизації витрати Na_2SO_4 на рівні:
 $a - X_1^{opt} = 4.56\%(-0.72)$; $\delta - X_1^{opt} = 4.38\%(-0.81)$



3.2. Під час дискретизації кількості пластифікатора на рівні:
 $a - X_2^{opt} = 1\%(+1)$; $\delta - X_2^{opt} = 1\%(+1)$



3.3. Під час дискретизації коефіцієнта розсунення щебеню на рівні:
 $a - X_3^{opt} = 1.1(-1)$; $\delta - X_3^{opt} = 1.1(-1)$

Рис. 3. Поверхні відгуку досліджуваної характеристики ОК бетонної суміші на:
 a – КЦ-1; δ – КЦ-2

2. Кількість пластифікатора. Для бетону на КЦ-2 залежності міцності R_{cm} від кількості пластифікатора є квадратичними у вигляді парабол з піднятими вверх вітками неоднакової кривини (рис. 2.1, б; 2.3, б). Для бетону на КЦ-1 міцність R_{cm} нелінійно зростає і досягає максимального значення при вмісті пластифікатора 1 % (рис. 1.1, б; 1.3, б). Вплив цього фактора найбільше проявляється в інтервалі $X_2 \in [0.25, 1.0]$.

Кількість пластифікатора несуттєво впливає на міцність R_{32} . Залежності міцності R_{32} від кількості пластифікатора є квадратичними у вигляді парабол з піднятими вверх вітками неоднакової кривини (рис. 2.1, а; 2.3, а) для бетону на КЦ-2 та нелінійно зростають для бетону на КЦ-1 (рис. 1.1, а; 1.3, а).

Кількість пластифікатора не вплинула вирішально на ОК бетонних сумішей. Проте його вплив значно підсилюється при зростанні витрати Na_2SO_4 та коефіцієнта розсунення. Зростання ОК відбувається за нелінійною залежністю. Найбільше значення ОК спостерігається при максимальній кількості пластифікатора (рис. 3.1, 3.3). Для бетонної суміші на КЦ-2 така сумісна дія факторів на ОК проявляється більшою мірою.

3. Коефіцієнт розсунення. Залежності міцності R_{cm} від коефіцієнта розсунення бетону на КЦ-2 є нелінійними і описуються параболою з опущеними вітками (рис. 2.1, б; 2.2, б). Водночас для бетону на КЦ-1 ці залежності є близькими до лінійних (рис. 1.1, б; 1.2, б). Зростання міцності R_{cm} в обох випадках відбувається при зменшенні значень цього фактора.

Вплив коефіцієнта розсунення найбільше проявляється для міцності R_{32} бетону на КЦ-1 (рис. 1.1, а; 1.2, а). Для бетону на КЦ-2 цей вплив є меншим. Збільшення коефіцієнта спричиняє зростання міцності R_{32} .

Збільшення коефіцієнта розсунення спричиняє зростання ОК бетонних сумішей за лінійною залежністю для бетону на КЦ-2 (рис. 3.1, б; 3.2, б) та за нелінійною залежністю для КЦ-1.

Висновки. 1. Для бетонів на основі МКЦ, які використовуються для виробництва бетонних і залізобетонних виробів у заводських умовах, розв'язана задача оптимізації рецептурно-технологічних параметрів за критерієм міцності бетону на стиск градієнтним методом. До математичної моделі задачі залучено обмеження, що враховують умови формування виробів і напружено-деформований стан бетонів у конструкції.

2. На основі аналізу поверхонь відгуку досліджуваних характеристик оцінено якісний та кількісний вплив рецептурно-технологічних параметрів на міцність бетону на розтяг під час згину та стиск і осадку конуса бетонної суміші.

3. Отримані оптимальні значення рецептурно-технологічних параметрів (витрата Na_2SO_4 – кількість пластифікатора *Addiment BV3* – коефіцієнт розсунення) для бетону на КЦ-1 (4.56 % – 1 % – 1.1) і для бетону на КЦ-2 (4.38 % – 1 % – 1.1) можна рекомендувати як рецептурний склад для практичного використання на заводах ЗБВ.

4. Найзначущішим фактором у технології бетону на основі МКЦ виявився вміст активатора Na_2SO_4 . Характер його впливу на показники міцності бетону описується нелінійною залежністю з екстремумом в області 4,5 %.

Зміна коефіцієнта розсунення не має суттєвого впливу на міцність бетонів на стиск.

Кількість пластифікатора практично не впливає на міцність бетонів на розтяг під час згину. Водночас спостерігається значний приріст міцності на стиск під час збільшення кількості пластифікатора для двох видів КЦ.

Найбільші значення ОК досягаються за дії пластифікатора в області максимальних значень витрати Na_2SO_4 і коефіцієнта розсунення. Дія пластифікатора не має значного самостійного пластифікуючого ефекту.

Досліджувані характеристики для бетону на основі КЦ-2 виявилися чутливішими до зміни значень факторів впливу порівняно з бетоном на КЦ-1.

1. Солодкий С. Й., Русин Р. М. Факторний експеримент в технології дорожніх бетонів на основі композиційних модифікованих цементів // Будівництво України. – 2004. – № 3. – С. 8–12.
2. Солодкий С. Й., Русин Р. М. Оптимізація рецептурно-технологічних параметрів бетону для дорожнього будівництва на основі модифікованих композиційних цементів // Будівництво України. – 2004. – № 4. – С. 22–27.
3. Пелешко І. Д., Юрченко В. В. К вопросу формулирования задач оптимизации в системах автоматизированного проектирования // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Самара, 23–26 сентября 2002 г. – Самара: НПФ “РАКС”, 2002. – С. 40.
4. Хог Э, Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции. – М.: Мир, 1983. – 478 с.
5. ГОСТ 21924.2–84 Плиты железобетонные с ненапрягаемой арматурой для покрытий городских дорог. Технические условия.
6. ГОСТ 17608–91 Плиты бетонные тротуарные. Технические условия.

УДК 532.582.82

В.В. Чернюк, Б.С. Піцишин, Б.А. Малиш
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра гідравліки та сантехніки

ТЕЧІЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ МЕТАУПОНУ МІЖ НЕСПІВВІСНИМИ ЦИЛІНДРАМИ

© Чернюк В.В., Піцишин Б.С., Малиш Б.А., 2004

Описані результати експериментальних досліджень впливу неспіввісності циліндрів, внутрішній з яких обертається у водному розчині метаупону, на значення середнього дотичного напруження на його стінці.

In the article the results of experimental researches of influence of a non-axiality of two cylinders, from which the internal one is gyrated in metaupon water solution, on the average shearing stress on it's wall are indicated.

Вступ. Рух рідини у проміжку між коаксіальними циліндрами трапляється в бурильних установках, підшипниках, гідромурфтах, гідротрансформаторах, гідравлічних гальмах [1, 2], мішалках. При цьому реалізується циркуляція робочої рідини в замкненому конфузотно-дифузотному проміжку між неспіввісними ротором і статором. У літературі [3–5] наведені результати досліджень течій між концентричними циліндрами, сферами та дисками. Із відомих нам робіт про течії між ексцентричними циліндрами [6–8] тільки в [8] досліджується вплив на потік рідини гідродинамічно-активних додатків (ГДАД), зокрема поліакриламід. Але розчини полімерів зазнають механічної деструкції при різкій зміні геометрії потоку, що ускладнює узагальнення цих результатів на течії рідин з іншими ГДАД. Розчини міцелотворних поверхнево-активних рідин (МПАР) після проходження крізь пристрої, що дестабілізують потік, відновлюють свою гідродинамічну активність [9]. Інформація про течії розчинів МПАР, зокрема метаупону, між неспіввісними циліндрами нам не відома. Тому актуальними є дослідження потоків між ротором і статором при змінному їх ексцентриситеті.

Метою роботи є експериментальне дослідження течії водяних розчинів метаупону між неспіввісними циліндрами та визначення величини середнього дотичного напруження на стінці внутрішнього циліндра.