

УДК 624.138

Я.І.Панасюк, В.В.Маліков, Б.А.Боярчук
Луцький національний технічний університет
**КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД У ВИЗНАЧЕННІ ЗМІНИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ З ДОДАВАННЯМ ПІГМЕНТІВ**

*Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів укріплених цементом з додаванням пігментів.
Оптимізація експерименту з використанням математичного планування.
Рис 4. Форм 3. Табл 8. Літ 8.*

Я.И.Панасюк, В.В.Маликов, Б.А.Боярчук
**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В ОПРЕДЕЛЕНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ГРУНТОВ УКРЕПЛЕННЫХ ЦЕМЕНТОМ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПИГМЕНТОВ**

*Исследование физико-механических свойств грунтов укрепленных цементом с добавлением пигментов.
Оптимизация эксперимента с использованием математического планирования.*

Ya.Panasuk, V.Malikov, B.Bojarchuk
**SOIL REINFORSMENT BY CEMENT WITH ADDED PIGMENTS OF COMPLEX APPROACH
IN DETERMINING CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES**

The article raises the question of the applicability of soil cement fortified with the addition of color pigment in the quality of road surfaces. Experiments were conducted using complex mathematical design of experiments to identify changes in physical and mechanical properties of the material on the concentration of binder and pigment. The proposed mathematical model is adequate compressive strength of the material and split. We found that increasing the percentage of the binder has a positive effect on the mechanical properties of the material and pigment opposite.

Одним із основних факторів, що впливає на емоційний стан людей, які проживають в містах і селах є кольорове оформлення середовища. Питанням оформлення міського середовища, як місця перебування значної кількості людей з метою отримати естетичне задоволення, довгий час займається міська архітектура і достатньо успішно. Внесення пігментів, використання кольорового заповнювача в складі асфальтобетонних сумішей або застосування різнокольорової бруківки, мозаїчних жорстких бетонних покриттів надає додаткові позитивні враження в сприйнятті міжбудинкового простору сучасної міської забудови та ландшафтно-паркового дизайну.

І хоча питання естетичного оформлення міської забудови, в нашому випадку шляхів сполучення, лежить в площині сприйняття історичної спадщини та психологічного упередження громади, все таки остаточне рішення визначається споживчою вартістю продукту. Тому використання місцевих матеріалів із додаванням пігментів для оформлення житлових зон може стати надзвичайно актуальним для місцевих громад.

З метою апробувати цеменогрунтові суміші із додаванням кольорового пігменту в якості дорожнього покриття на базі будівельної лабораторії Луцького НТУ було заплановано проведення ряду дослідів, які б змогли відповісти на питання, як впливає кількість пігменту на фізико-механічні властивості матеріалу та знайти оптимальні співвідношення для них.

Для приготування сумішей на основі ґрунту в якості в'язучого використовувався портландцемент марки М 500, який відповідав вимогам [1], в якості добавки використовувався пігмент фірми САТАУ (виробник Китай) червоного кольору, основна хімічна складова якого – оксид заліза Fe_2O_3 , насипна щільність – 0,8-1,2 г/мл і питома вага – 4,9 г/см³ відповідав вимогам [2]. Вода для приготування сумішей відповідала вимогам [3].

В якості ґрунту використовувався пісок мілкий [4], властивості якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Властивості прийнятого для досліджень ґрунту

		Гранулометричний склад, %	
Розмір зерен, мм	2-1	0,4	
	1-0,5	1,6	
	0,5-0,25	32,8	
	0,25-0,071	60,2	
	<0,071	5	
Границя текучості, %		7,5	
Оптимальна вологість при максимальній щільності, %		7	
Максимальна щільність при оптимальній вологості, г/см ³		2,148	

Концентрація цементу у складі досліджуваних сумішей становила 6 %, 10%, 14%, 17 % та 20 % від маси сухого ґрунту.

Для визначення кількості води проводилось дослідження визначення оптимальної вологості при максимальній щільності [5]. Дослідженнями встановлено наступні оптимальні показники для досліджуваних укріплених ґрунтів представлені в табл.2.

Таблиця 2

Оптимальні параметри щільності при встановленій вологості

№ з.п.	Назва складу	Вологість, %	Щільність, г/см ³
1.	Ґрунт, 6 % цементу	7%	2,152
2.	Ґрунт, 10 % цементу	8%	2,160
3.	Ґрунт, 14 % цементу	8%	2,169
4.	Ґрунт, 17 % цементу	9%	2,177
5.	Ґрунт, 20 % цементу	9%	2,184

Для досліджень властивостей укріпленого ґрунту застосовувались методи, які викладені в нормативних документах [6, 7, 8].

Для визначення фізичних властивостей укріпленого ґрунту були заформовані серії зразків-циліндрів 50x50 мм (по 6 зразків на точку).

Зразки формувалися при навантаженні 150 кгс/см². Після витримання виготовлених зразків на протязі 7 та 28 діб в ванні з гідравлічним затвором були проведені досліди із визначення границі міцності при стиску.

Наведені на рис.1 результати визначення границі міцності при стиску показують, що збільшення концентрації цементу від 6 % до 20 % призводить до зростання цього показника як на 7, так і на 28 добу набору міцності. Так при додаванні 6 % цементу на 7 добу границя міцності при стиску становить 0,67 МПа, 10 % цементу 1,23 МПа, 14% – 2,38 МПа, 17% – 3,51МПа, а 20 % – 3,88 МПа. Інтенсивність зростання границі міцності при стиску цементогрунту на 28 добу при додаванні 10 % цементу збільшилась в 1,68 рази порівняно з цементогрунтом з додаванням 6 % цементу, при додаванні 14 % цементу в 3,22 рази, при додаванні 17 % цементу в 4,88 рази, а при додаванні 20 % цементу в 5,95 рази.

За величиною границі міцності при стиску на 28 добу цементогрунт з вмістом 6 % цементу можливо віднести до марки М 10, з 10 % цементу – до М 20, 14 % – до М 40, 17 % – до М 60, 20 % – до М 75.

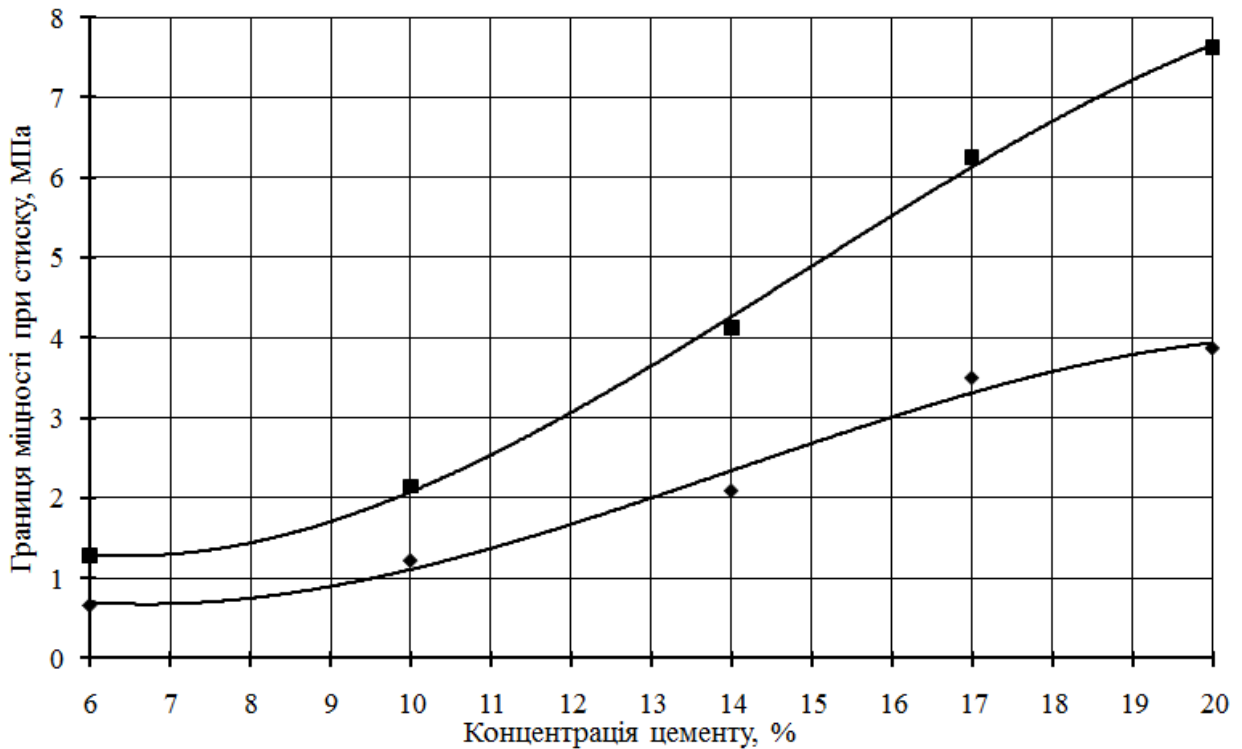


Рис. 1. Залежність границі міцності при стиску від концентрації цементу в цементогрунтовій суміші (♦ – 7 доба твердіння, ■ – 28 доба твердіння)

На основі ґрунту укріпленого 14 % цементу (марка М 40) були заформовані зразки з додаванням пігменту червоного кольору, концентрація якого становила 1 %, 3 %, 5 %, 7 % та 10 % від маси цементу. Це було зроблено для візуального сприйняття цементогрунту з додаванням різної концентрації пігменту червоного кольору.

Для визначення кількості води проводилось дослідження визначення оптимальної вологості при максимальній щільності. Результатами дослідження встановлено наступні оптимальні показники для досліджуваних укріплених ґрунтів цементом з додаванням пігменту червоного кольору представлені в табл.3.

Таблиця 3

Оптимальні параметри щільності при встановленій вологості

№ з.п.	Назва складу	Вологість, %	Щільність, г/см ³
1.	Цементогрунт, 1 % пігменту	8%	2,164
2.	Цементогрунт, 3 % пігменту	9%	2,175
3.	Цементогрунт, 5 % пігменту	9%	2,184
4.	Цементогрунт, 7 % пігменту	10%	2,191
5.	Цементогрунт, 10 % пігменту	10%	2,198

Результати виконаних експериментальних досліджень, свідчать про те, що пігмент червоного кольору практично не впливає на границю міцності при стиску, порівняно з цементогрунтом без пігменту (рис. 2). Так, на 7 добу твердіння міцність при стиску контрольних зразків (цементогрунт без фібри) становить 2,10 МПа, при додаванні 1 % пігменту – 1,87 МПа, 3 % пігменту – 2,07 МПа, 5 % – 2,10 МПа, 7 % – 2,08 МПа, 10 % – 2,06 МПа. На 28 добу твердіння міцність при стиску досліджуваного цементогрунту та цементогрунту з додаванням пігменту збільшилась, відповідно, в 1,96 рази (контрольні зразки), в 2,16 рази при 1 % пігменту, в 1,98 рази при 3 % пігменту, в 1,97 рази при 5 % пігменту, в 1,96 рази при 7 % пігменту та в 1,97 рази при 10 % пігменту.

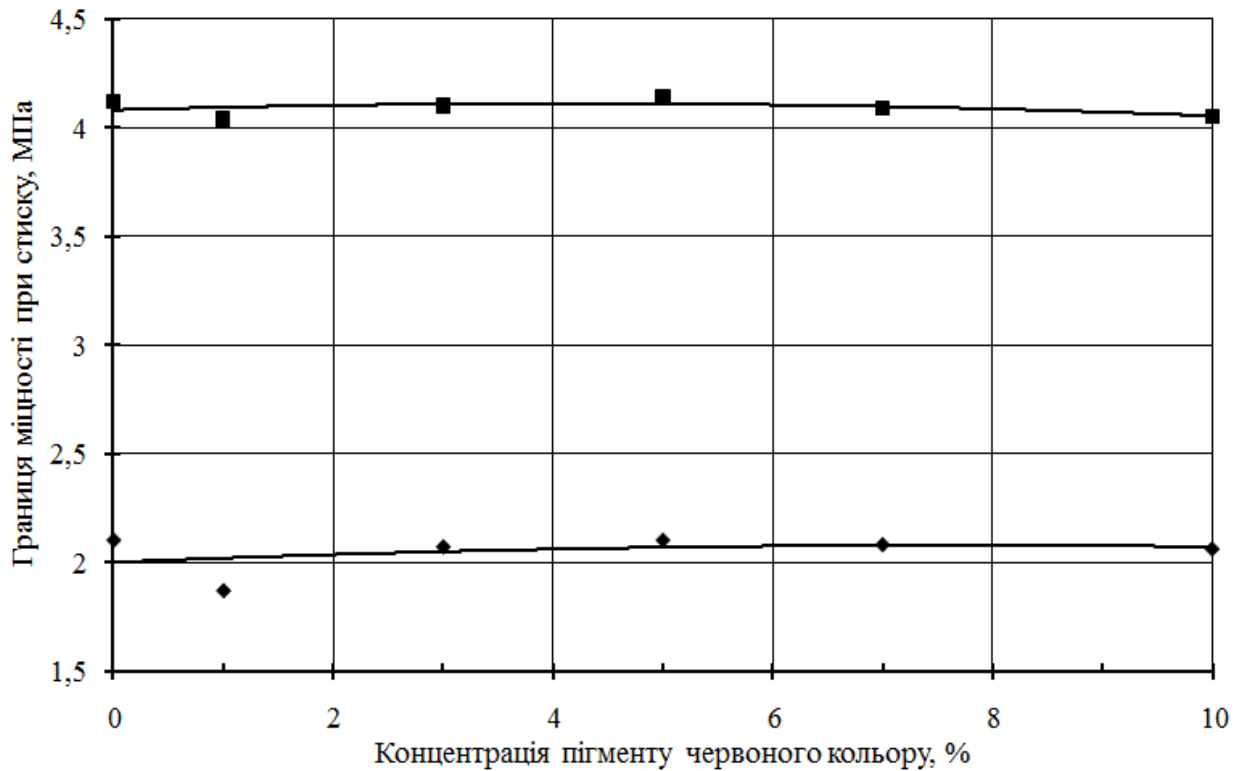


Рис. 2. Залежність границі міцності при стиску цементогрунту від концентрації пігменту (♦ – 7 доба твердіння, ■ – 28 доба твердіння)

Проводилось визначення коефіцієнта морозостійкості після 30 циклів заморожування-відтавання за критерієм міцності при стиску наведені в таблиці 4. З наведених в таблиці 4 даних видно, що після 30 циклів заморожування-відтавання із збільшенням вмісту пігменту у цементогрунті коефіцієнт морозостійкості збільшується, тобто морозостійкість цементогрунту зростає.

Таблиця 4

Коефіцієнт морозостійкості цементогрунту в залежності від концентрації пігменту

№ з.п.	Назва складу	$K_{мрз}$
1.	Цементогрунт	0,76
2.	Цементогрунт, 1 % пігменту	0,76
3.	Цементогрунт, 3 % пігменту	0,78
4.	Цементогрунт, 5 % пігменту	0,81
5.	Цементогрунт, 7 % пігменту	0,86
6.	Цементогрунт, 10 % пігменту	0,89

Для отримання адекватної математичної моделі впливу складових (факторів) суміші на механічні властивості цементогрунту заплануємо проведення дослідів на основі математичної моделі таблиця 5 (ортогональний центральний композиційний план ОЦКП). За основу залежності міцності цементогрунту на одновісне стискання від кількості цементу та кольорового пігменту оберемо поліном першого порядку:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 \quad (1)$$

За центр області вишукувань приймаємо склад цементогрунту з проектною маркою М 40 та закодуємо відсоткові значення X_1 , X_2 складових, як x_1 та x_2 з інтервалом варіювання i (-1, 0, 1), таблиця 6.

Матриця експерименту

Таблиця 5

№ досліджу	x_0	x_1	x_2	x_1x_2
1	1	-1	-1	1
2	1	-1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	1	1	1
5	1	1	0	0
6	1	0	1	0
7	1	0	-1	0
8	1	-1	0	0
9	1	0	0	0

Таблиця кодування факторів

Таблиця 6

Складові			i	+1	-1	0
% цементу	x_1	X_1	4	18	10	14
% пігменту	x_2	X_2	2	7	3	5

Результати проведених дослідів

Таблиця 7

№ досліджу	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	МПа на (28день)						Середнє значення, МПа
					Серія I	Серія II	Серія III	Серія IV	Серія V	Серія VI	
1	1	-1	-1	1	2.20	2.12	2.20	2.25	1.95	2.45	2.19
2	1	-1	1	-1	1.50	1.75	2.25	2.25	1.45	2.25	1.94
3	1	1	-1	-1	5.51	6.06	5.98	6.03	5.78	6.07	5.90
4	1	1	1	1	7.66	6.68	7.35	6.88	6.41	6.76	7.14
5	1	1	0	0	4.05	3.90	3.12	3.65	4.08	3.40	3.68
6	1	0	1	0	8.28	8.00	7.73	7.87	6.36	7.89	7.69
7	1	0	-1	0	2.47	2.37	2.52	1.89	2.10	2.44	2.30
8	1	-1	0	0	3.21	4.11	4.12	4.01	3.03	3.70	3.86
9	1	0	0	0	4.25	4.25	4.55	3.81	4.61	4.10	4.21

Перевірка результатів за статистикою Кохрена підтвердила відтворюваність результатів дослідів $G_p < G_T$ де $G_p = 0,32$ – розрахункове значення та $G_T = 0,36$ – табличне значення, тобто всі отримані дані однорідні.

Після підрахунку коефіцієнтів рівняння та оцінки їх значущості, побудуємо поверхню значень із практичних результатів дослідів, залежність міцності на стиск від зміни процентного складу цементу та пігменту рис.3.

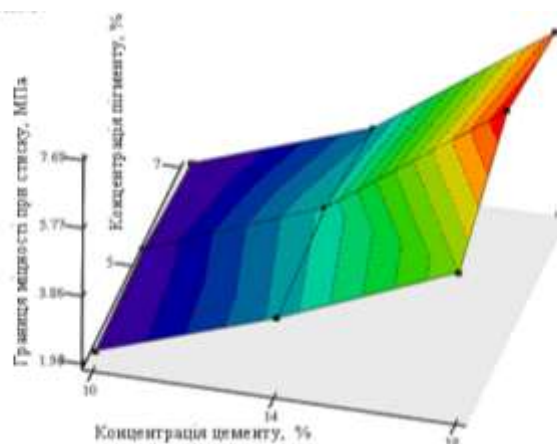


Рис. 3. Поверхня функції відгуку для експериментальних даних границі міцності при стиску цементогрунту в залежності від кількості цементу та пігменту

Концентрація цементу, %
 ©Я.І.Панасюк, В.В.Маліков, Б.А.Боярчук

Аналіз коефіцієнтів полінома за допомогою статистики Стьюдента показує достатньо значний прямо пропорційний зв'язок між границею міцності при стиску та кількістю цементу. Виявлено оптимальну кількість пігменту, яка становить 5 % за критерієм границі міцності при стиску.

Рівняння регресії, яке відображає залежність міцності на стиск від зміни процентного змісту кольорового цементогрунту можна представити у наступному вигляді:

$$Y = 4.32 + 0.97X_1 - 0.49X_2 + 0.17X_1X_2 \quad (2)$$

Перевірка адекватності за статистикою Фішера показала достовірність запропонованої моделі: при розрахунковій дисперсії $S_p = 0.949$ та значеннями дисперсії практичних даних $S_r = 0.236$ в порівнянні з розрахунковим та табличним значенням $F_p = 4.01 < F_r = 5.35$, рівень значущості $\alpha = 0.01$.

Для визначення характеристики матеріалу із показником розколу була проведена обробка результатів аналогічно визначенню на стиск за результатами таблиці 8.

Результати проведених дослідів

Таблиця 8

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Кгс (28день)			Середнє значення, МПа
					Серія I	Серія II	Серія III	
1	1	-1	-1	1	0.69	0.75	0.78	0.74
2	1	-1	1	-1	0.71	0.84	0.78	0.78
3	1	1	-1	-1	2.08	2.03	2.01	2.04
4	1	1	1	1	2.48	2.51	2.54	2.51
5	1	1	0	0	1.97	2.00	1.91	1.96
6	1	0	1	0	2.79	2.76	2.69	2.75
7	1	0	-1	0	0.85	0.81	0.74	0.80
8	1	-1	0	0	1.51	1.57	1.54	1.54
9	1	0	0	0	1.98	2.01	1.95	1.98

Перевірка результатів за статистикою Кохрена підтвердила відтворюваність результатів дослідів $G_p < G_r$ де $G_p = 0,25$ – розрахункове значення та $G_r = 0,48$ – табличне значення, тобто всі отримані данні однорідні.

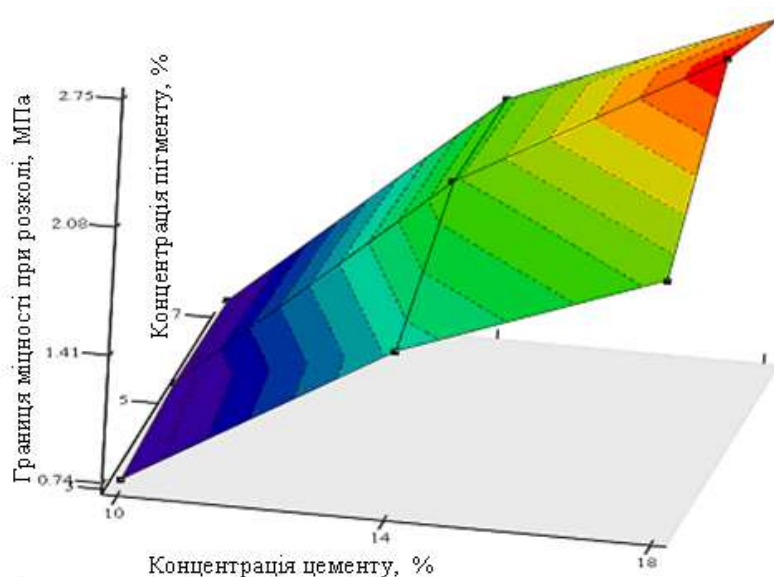


Рис. 4. Поверхня функції відгуку для експериментальних даних границі міцності при розколі цементогрунту в залежності від зміни кількості цементу та пігменту

Визначені коефіцієнти полінома перевірили за допомогою статистики Стьюдента та виявили також, як і в першому випадку, достатньо значний прямо пропорційний зв'язок між границею міцності при розколі та кількістю цементу і виявлено оптимальну кількість кольорового пігменту яка як і у випадку визначення границі міцності при стиску становила 5%. Різниця між ступенями впливу факторів на марку при розколі біля 3-ох разів. Для першого фактору $t_1 = 9.87$ у порівнянні $t_2 = -4.12$ для другого фактору (критичне табличне значення $t_{0,95} = 2.101$).

Рівняння регресії, яке відображає залежність міцності на стиск від зміни процентного змісту кольорового цементогрунту можна представити у наступному вигляді:

$$Y = 1.68 + 0.38X_1 - 0.16X_2 + 0.05X_1X_2 \quad (3)$$

Перевірка адекватності за статистикою Фішера показала достовірність запропонованої моделі: при розрахунковій дисперсії $S_p = 0.745$ та значеннями дисперсії практичних даних $S_r = 0.312$ в порівнянні з розрахунковим та табличним значенням $F_p = 2.48 < F_r = 6.99$, рівень значущості $\alpha = 0.01$.

Досліджено концентрації цементу для укріплення ґрунту за критерієм міцності при стиску, що відповідають маркам М 10, М 20, М 40, М 60 та М 75.

Визначена границя міцності при стиску цементогрунту марки М 40 з додаванням різної концентрації пігменту червоного кольору та коефіцієнт морозостійкості після 30 циклів заморожування відтавання. Встановлено, що збільшення концентрації червоного пігменту у цементогрунті призводить до збільшення коефіцієнту морозостійкості, а границя міцності при стиску як на 7, так і на 28 добу залишається майже незмінною.

Застосований підхід до проведення експерименту надає можливість використовувати математичне планування його проведення та прискорити час на його виконання за рахунок зменшення кількості зразків без втрати проміжних результатів та із достатнім статистичним підтвердженням.

1. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-46-96. – [Чинний від 1996-10-03] – Держкоммістобудування України. – К.: Держкоммістобудування України, 1996.
2. ДСТУ 1438-94 Пігмент для фарб. Загальні технічні умови. Держстандарт України, Київ – 1995.
3. Будівельні матеріали. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-273:2011 (ГОСТ 23732-79). – [Чинний від 2012-12-01]. – К.: Науково-дослідний інститут будівельних матеріалів і продукції, 2011.
4. ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95) Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація. Державний комітет України містобудування і архітектури, Київ – 1997.
5. ДСТУ Б В.2.1-12:2009 Метод лабораторного визначення максимальної щільності, Мінрегіонбуд України, Київ – 2010.
6. ВБН В.2.3-218-541:2010. Споруди транспорту. Влаштування шарів дорожніх одягів з ґрунтів, укріплених в'язучими матеріалами. Дордерж НДІ, Київ – 2010.
7. Проектування і будівництво основ та покриттів автомобільних доріг із кам'яних матеріалів, промислових відходів і ґрунтів, укріплених цементом: ВБН В.2.3-218-002-95. – [Чинний від 1995-12-11]. – К.: Укравтодор, 1995.
8. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и ґрунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия: ГОСТ 23558-94. – [Чинний від 1995-01-01]. – М., 1994.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2014.