

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 691.327/.33:[666.97:519.6]

М. І. НЕТЕСА¹, А. В. КРАСНЮК², А. М. НЕТЕСА³, Н. А. НІКІФОРОВА^{4*}

¹ Кафедра будівельного виробництва та геодезії, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

² Декан факультету промислового та цивільного будівництва, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 606 03 99, ел. пошта krasnyuk@mail.diit.edu.ua ORCID 0000-0002-1400-9992

³ Кафедра будівельного виробництва та геодезії, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 769 25 51, ел. пошта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

^{4*} Кафедра будівельного виробництва та геодезії, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 640 68 83, ел. пошта 2017natanik@gmail.com, ORCID 0000-0003-1922-8614

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ ІЗ ВТОРИННИМИ ПРОДУКТАМИ ПРОМИСЛОВОСТІ

Мета. Провести аналіз наукових публікацій щодо існуючих проблем забруднення навколишнього середовища вторинними продуктами промисловості. Пошук шляхів вирішення цих питань раціональним використанням в будівництві бетону з добавками вторинних продуктів промисловості, особливо дрібнозернистих. Визначення раціональних складів бетону середньої міцності з мінімально необхідною витратою цементу та наповнювача з хвостів збагачення залізних руд гірничо-збагачувальних комбінатів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проаналізований досвід щодо поліпшення структури та властивостей бетону уведенням у його склад комплексних добавок на основі вторинних продуктів промисловості. Для проведення досліджень використовували наступні матеріали: Криворізький портландцемент СЕМ 41,7; у якості крупного заповнювача – гранітний щебінь з максимальною крупністю зерен 20 мм; дрібного заповнювача – пісок кварцовий річковий; мінеральної добавки – хвости збагачення залізних руд Південного гірничо-збагачувального комбінату. Експеримент проводили на сертифікованому обладнанні. Формували контрольні зразки – кубики зі стороною 10 см. Міцність бетону при стисненні визначали за стандартною методикою в 28-добовому віці після тверднення в звичайних умовах. За результатами математичного аналізу експерименту будували графічні залежності зміни характеристик, що оптимізуються від варійованих параметрів – витрат на 1 м³ бетонної суміші цементу, хвостів збагачення залізних руд і пластифікуючої добавки. **Результати.** За результатами випробування зразків проведений розрахунок математичних моделей експерименту і отримані поліноми третього ступеня по параметрам, які оптимізувалися – середньої міцності зразків в 28-добовому віці і коефіцієнту ефективності використання цементу. Можна визначити наступні закономірності. Міцність бетону в найбільшій мірі залежить від витрати цементу в складі бетонної суміші і суттєво збільшується в міру збільшення його вмісту в досліджуваних межах. При збільшенні вмісту наповнювача в досліджуваному діапазоні міцність бетону, а відповідно і коефіцієнт ефективності використання цементу, зростає із зменшенням вмісту цементу в складі бетонної суміші. **Наукова новизна.** Проведені дослідження дозволяють визначити основні закономірності підвищення ефективності використання цементу при утилізації в бетоні місцевих вторинних продуктів промисловості, а саме введення в якості дрібнозернистої добавки в бетон відходів збагачення залізних руд ГЗК. Було встановлено, що отримати необхідну низьку міцність бетону при значно меншій витраті цементу можна при забезпеченні раціонального зернового складу компонентів бетонної суміші. **Практична значимість.** При проектуванні складів бетону з високим коефіцієнтом використання цементу необхідно використовувати отримані результати досліджень, забезпечуючи економію цементу та утилізуючи значну кількість дрібнозернистих вторинних продуктів промисловості.

Ключові слова: зерновий склад заповнювачів; відходи збагачення залізних руд; дрібнозерниста добавка; поліном; математична модель

Вступ

Екологічні проблеми в двадцять першому столітті залишаються першорядними. Несвоє-

часне їх рішення може загрожувати можливості подальшого комфортного існування людини в світі. Однією з найбільш важливих екологічних

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

проблем є істотне забруднення навколишнього середовища вторинними продуктами промисловості в результаті нераціонального некомплексного використання природних ресурсів. Крім того висока енергоємність продукції призводить до вичерпання природних ресурсів. А при їх згоранні в атмосферу викидається значна кількість вуглекислого газу та інших забруднюючих її речовин. Ця проблема важлива і для будівельного комплексу. Одним з основних будівельних матеріалів для будівництва є бетон. Рациональним його використанням можна значною мірою забезпечувати вирішення екологічних проблем. Цей матеріал залишиться одним з основних конструкційних матеріалів на доступну для огляду перспективу, обсяги його використання постійно зростають. У складі бетону енергоємність цементу складає приблизно 70...80 % від загальних витрат енергії на його виробництво. На виробництво кожної тони цементу витрачається близько 290 кілограмів умовного палива, а в атмосферу викидається (за деякими даними) до півтора тон вуглекислого газу. Тому при визначенні складів бетону основну увагу необхідно приділяти мінімально необхідній кількості цементу для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик. Необхідно підвищувати ефективність використання цементу в бетонах. Крім того важливо в бетонах утилізувати як можна більше вторинних продуктів промисловості, особливо дрібнозернистих, які займають значні площі відвалів і вельми небезпечні для навколишнього середовища.

Проектуванню складів бетону, що забезпечують необхідні фізико-механічні його характеристики для різних конструкцій і умов їх експлуатації, дослідниками приділяється багато уваги (Власов, Карнет, & Муковникова, 2017). Це ключове питання бетоноведення. Бетони відносяться до композиційних матеріалів, тому закономірності побудови їх структури, залежності основних фізико-механічних характеристик від складів і структури практично єдині (Баженов, 2014). Вивченню впливу структурних особливостей бетону на його властивості присвячено багато основоположних робіт (Выровой, Коробко, & Панасюк, 2016; Коробко, Выровой, & Рожнюк, 2015; Vırovoi, Korobko, Zavoloka, & Kořıurubenko, 2017; Vyrovoy, Korobko, & Ielkin, 2017). Ефективним напрям-

ком проведених досліджень з метою поліпшення структури і властивостей бетону є використання в їхніх складах вторинних продуктів промисловості (Дворкін, Житковський, Марчук, Степасюк, & Скрипник, 2017). До цього ж напрямку відноситься робота (Пушкарьова, Дворкін, & Градобоев, 2014), в якій автори обґрунтовують необхідність і шляхи зниження енергоємності бетону й інших композиційних матеріалів. Зниження енергоємності окремих видів бетону автор (Толстой, Лесовик, Загороднюк, & Ковалева, 2015) рекомендує забезпечувати введенням в його склади значної кількості дрібнозернистих вторинних продуктів промисловості, які можуть забруднювати навколишнє середовище. Цю ж проблему пропонують аналогічно вирішувати і автори (Вандоловський, & Чайка, 2016) утилізацією в бетонах відходів гірничо-збагачувальних комбінатів.

Модифікацією бетону введенням комплексних добавок, в тому числі на основі вторинних продуктів промисловості, забезпечується істотне поліпшення властивостей бетону (Ляшенко, & Довгань, 2016; Руденко, 2015; Нетеса, 2015; Краснюк, Момот, & Нікіфорова, 2013). Цій же проблемі присвячена робота (Banthia, Majdzadeh, Wu, & Bindiganavile, 2014), в якій автори пропонують рішення аналогічних проблем для високоміцного бетону. В роботі (Erdem, & Kırca, 2008) представлені закономірності впливу суміші різних мінеральних комплексів, в тому числі з використанням вторинних продуктів промисловості, на найважливіші характеристики бетону. Вплив суперпластифікаторів на властивості бетонних сумішей вельми специфічне в бетонах, отриманих на основі вторинних продуктів промисловості, в тому числі високоміцних (Shetty, Nayak, & Vijayan, 2014). Нами також проводилися дослідження з вивчення впливу кількості хвостів збагачення залізних руд на властивості низькоміцних бетонів (Shishkin, Netesa, & Scherba, 2017; Pshynko, Radkevych, Netesa, M., & Netesa, A., 2020).

У наведеному аналізі результатів проведених досліджень успішно вирішується проблема підвищення ефективності використання цементу в бетонах шляхом додавання в них дрібнозернистих вторинних продуктів промисловості. Однак, знайти єдину закономірність кількісного і якісного їх застосування для найбільш ефек-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ктивного підвищення використання цементу в бетонах при максимально можливій утилізації в них вторинних продуктів не вдається. Це пов'язано з різноманітністю властивостей використовуваних в бетонах компонентів, в тому числі пластифікуючих добавок. Тому необхідно такі завдання вирішувати для окремих видів компонентів, визначаючи їх раціональну кількість в залежності від необхідних фізико-механічних характеристик бетону.

Особливо важливе вирішення цієї проблеми для бетону низької міцності, в якому ефективність використання цементу значно нижче, ніж в бетоні середньої і високої міцності. В якості робочої гіпотези проведених досліджень слід прийняти гіпотезу про доцільність забезпечення раціонального зернового складу компонентів бетонної суміші, при якому забезпечується мінімальна пористість суміші. Отже, у затверділого бетону можна знизити дефектність структури і концентрацію небезпечних для бетону напружень, що розтягують.

Мета

Метою досліджень є визначення раціональних складів бетону з середньою кубиковою міцністю на стиск менше 20 МПа з мінімально не-

обхідною витратою цементу. Для реалізації поставленої мети необхідно визначати потрібну кількість наповнювача з хвостів збагачення залізних руд у складі бетонної суміші, введенням якого можна забезпечити раціональний гранулометричний склад її компонентів.

Для оцінки ефективності використання цементу в проєктованих складах бетону необхідно визначати і аналізувати коефіцієнт ефективності використання цементу, який виражає відношення досягаємої міцності бетону на одиницю витрати цементу в складі бетонної суміші.

Методика

Для вирішення поставленого завдання використовували Криворізький портландцемент СЕМ 41,7, у якості крупного заповнювача – гранітний щебінь з максимальною крупністю зерен 20 мм. Як дрібний заповнювач використовували пісок кварцовий річковий із середньою густиною породи 2630 кг/м³, насипною густиною 1550 кг/м³, порожнистістю 41 %, модулем крупності 1,56. Вміст шкідливих домішок в межах норми.

Результати розсівання наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розсівання дніпровського річкового кварцового піску

Залишок на ситах, у відсотках за масою	Розміри отворів сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	менше ніж 0,14
Часткові	1,0	2,4	7,85	37,9	42,05	8,8
Повні	1,0	3,40	11,25	49,15	91,2	100

В якості мінеральної добавки використовувалися хвости збагачення залізних руд Південного гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК), які відповідали вимогам норм. Особливістю хвостів збагачення залізних руд Південного ГЗК є нерівномірний зерновий склад, який істотно залежить від місця їх відбору та може

складатися як з більших фракцій, що належать до дрібного заповнювача (піску), так і більш дрібних, що відносяться до мінеральних добавок – наповнювачів. Фракційний склад хвостів збагачення залізних руд Південного ГЗК, який використовується в даному експерименті, представлений в табл. 2, а хімічний – в табл. 3.

Таблиця 2

Гранулометричний склад хвостів збагачення залізних руд Південного ГЗК

Вміст у відсотках за масою фракцій розміром, мкм								
менше 5	6...10	11...20	21...30	31...40	41...50	51...66	67...100	більше 100
4,13	3,54	7,93	15,71	19,7	12,41	11,48	15,39	9,71

Таблиця 3

**Хімічний склад хвостів збагачення залізних руд
 Південного ГЗК**

Хімічний склад, %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
62,1	1,3	6,56	8,34	4,64	6,69

Для поліпшення технологічних властивостей бетонної суміші застосовували комплексну добавку місцевого виробництва ПЛКП-2. Ця добавка виготовлена на основі вторинних продуктів коксохімічного виробництва. Добавка містить в основному тіосульфати, радоніди, сульфати натрію і деякі інші речовини. Для поліпшення пластифікуючих властивостей додатково введена добавка С-3.

Експериментальні дослідження проводилися на сертифікованому обладнанні. Бетонну суміш перемішували в лабораторній бетономішалці примусової дії ємністю 25 літрів. Компоненти дозували по масі. Час перемішування одного замісу об'ємом 7 літрів становив 3 хвилини. Контрольні зразки – кубики з розміром сторони 10 см ущільнювали на стандартній лабораторній віброплощині з частотою дії вібрації 50 Гц, амплітудою 0,35...0,5 мм. Міцність при стисненні визначали за стандартною методикою в 28-добовому віці після твердіння в стандартних умовах на пресі ПСУ-50.

Проведено математичне планування експерименту з наступною обробкою результатів випробувань. У якості варійованих факторів прийняті витрати на кубометр бетонної суміші, я саме: цементу (X_1), хвостів збагачення залізних руд (X_2), пластифікуючої добавки ПЛКП-2 (X_3). Діапазон варіювання цих трьох змінних представлений в табл. 4, а ортогональний план експерименту в табл. 5.

Таблиця 4

Варійовані фактори

Код	Натуральні значення		
	Ц, кг (X_1)	Хвости, кг (X_2)	Д, % (X_3)
1	90	100	0,5
0	140	250	1,0
+1	190	400	1,5

В якості параметрів, які оптимізуються, прийняті наступні: середня кубикова міцність

зразків бетону різних складів в 28-добовому віці і коефіцієнт ефективності використання цементу в цих складах.

Таблиця 5

Ортогональний план експерименту

№ випробування	Варійовані фактори		
	X_1	X_2	X_3
1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1
5	-1	-1	-1
6	-1	-1	+1
7	-1	+1	-1
8	+1	-1	-1
9	+1	0	0
10	-1	0	0
11	0	+1	0
12	0	-1	0
13	0	0	+1
14	0	0	-1
15	0	0	0

Розрахунок математичної моделі експерименту і побудова графічних залежностей проводилися за спеціальною програмою. Рівняння, яким описується трьохфакторна модель, має вигляд:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_{11} \cdot X_{12} + a_{22} \cdot X_{22} + a_{33} \cdot X_{32} + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + a_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

де Y – відклик моделі (параметр, якій оптимізується);

a_0 – вільний член полінома;

a_i – коефіцієнти при окремих членах полінома;

X_i – варійовані фактори в кодовому вигляді.

Всі коефіцієнти цього полінома при ортогональному плануванні не тільки визначаються, а й оцінюються незалежно один від одного.

Після визначення коефіцієнтів моделі перевіряли адекватність (тотожність) опису процесу поліномом третього ступеня по F критерію (критерію Фішера).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для аналізу отриманих поліномів третього ступеня (1) будувалися номограми, що представляють ізополя й ізолінії залежності зміни характеристик, що оптимізуються від варійованих параметрів.

Результати

По вище представленому ортогональному плану з 15 замісів відформовано по три зразки кубика з розміром сторони 10 см. Випробування зразків проведено в 28-добовому віці після твердіння в стандартних умовах. Візуальними

спостереженнями за процесом приготування і формування зразків відзначено, що в зразках з сумарним вмістом цементу і наповнювача 190 і 240 кг/м³ відповідно на кубометр бетонної суміші спостерігалася водовідділення, вони ущільнювалися значно гірше, ніж зразки інших складів. Найбільш легко і швидко ущільнювалися зразки, які формувалися з бетонних сумішей з сумарним вмістом цементу і наповнювача більше 500 кг на кубометр бетонної суміші. Результати випробувань всіх 15 серій зразків представлені в табл. 6.

Таблиця 6

Склади та результати випробувань зразків бетону

№ складу	Витрати матеріалів на м ³ , кг						Щільність, кг/м ³		Міцність R ₆ , МПа	10 R ₆ /Ц
	Ц	Н	Щ	П	В	ПЛКП-2, %	свіжовідформовані	затверділі		
1	190	400	1150	500	190	1,5	2410	2395	18,5	0,97
2	190	400	1150	500	190	0,5	2396	2381	19,1	1,0
3	190	100	1250	700	190	1,5	2341	2322	16,3	0,86
4	90	400	1150	600	190	1,5	2385	2371	9,5	1,05
5	90	100	1250	800	190	0,5	2274	2261	3,5	0,39
6	90	100	1250	800	190	1,5	2285	2278	3,4	0,38
7	90	400	1150	600	190	0,5	2396	2379	9,1	1,01
8	190	100	1250	700	190	0,5	2381	2375	15,2	0,8
9	190	250	1150	650	190	1,0	2418	2391	17,5	0,92
10	90	250	1250	650	190	1,0	2345	2326	5,7	0,63
11	140	400	1150	550	190	1,0	2397	2378	14,3	1,02
12	140	100	1250	750	190	1,0	2328	2311	10,7	0,76
13	140	250	1250	600	190	1,5	2391	2378	12,4	0,88
14	140	250	1250	600	190	1,0	2389	2375	11,8	0,84
15	140	250	1250	600	190	0,5	2397	2379	12,5	0,89

За представленими в табл. 6 результатами випробування зразків проведений розрахунок математичних моделей експерименту і отримані поліноми третього ступеня (1) по оптимізованій середній міцності зразків в 28-добовому віці і коефіцієнту ефективності використання цементу.

Графічні залежності міцності бетону від варійованих факторів, отримані за результатами розрахунків математичних моделей експерименту і отриманого полінома третього ступеня (1) представлені на рис. 1. А графічні залежності коефіцієнта ефективності використання цементу від варійованих факторів, отримані за ре-

зультатами розрахунків математичних моделей експерименту і отриманого полінома третього ступеня (1) представлені на рис. 2.

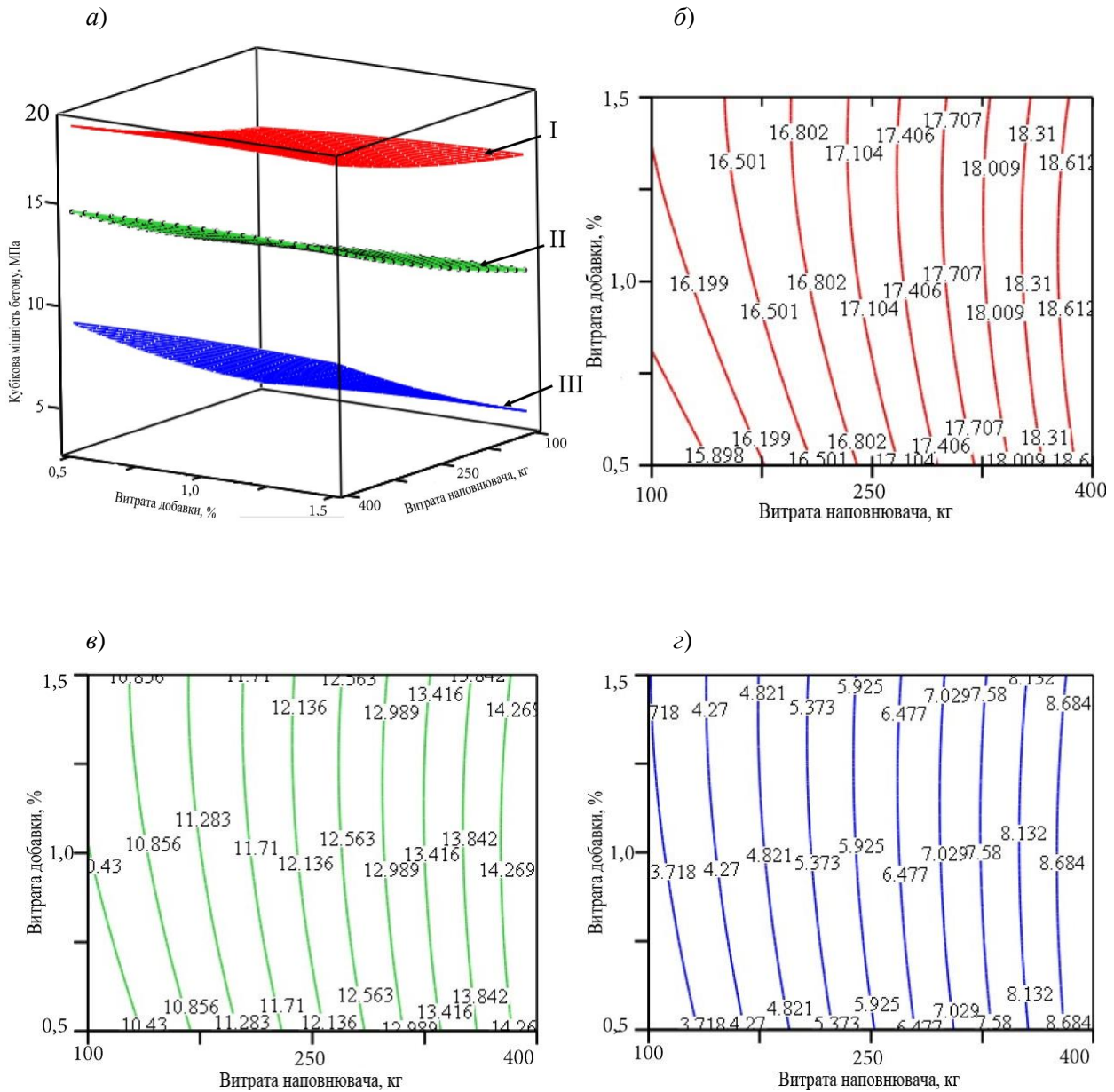


Рис. 1. Залежності міцності бетону від варійованих факторів:

- а) ізополя міцності бетону:
 - I – при витраті цементу 190 кг на кубометр бетонної суміші;
 - II – теж саме при 140 кг;
 - III – теж саме при 90 кг;
- б) ізолінії міцності бетону при витраті цементу 190 кг на кубометр бетонної суміші;
- в) теж саме при 140 кг; г) теж саме при 90 кг

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

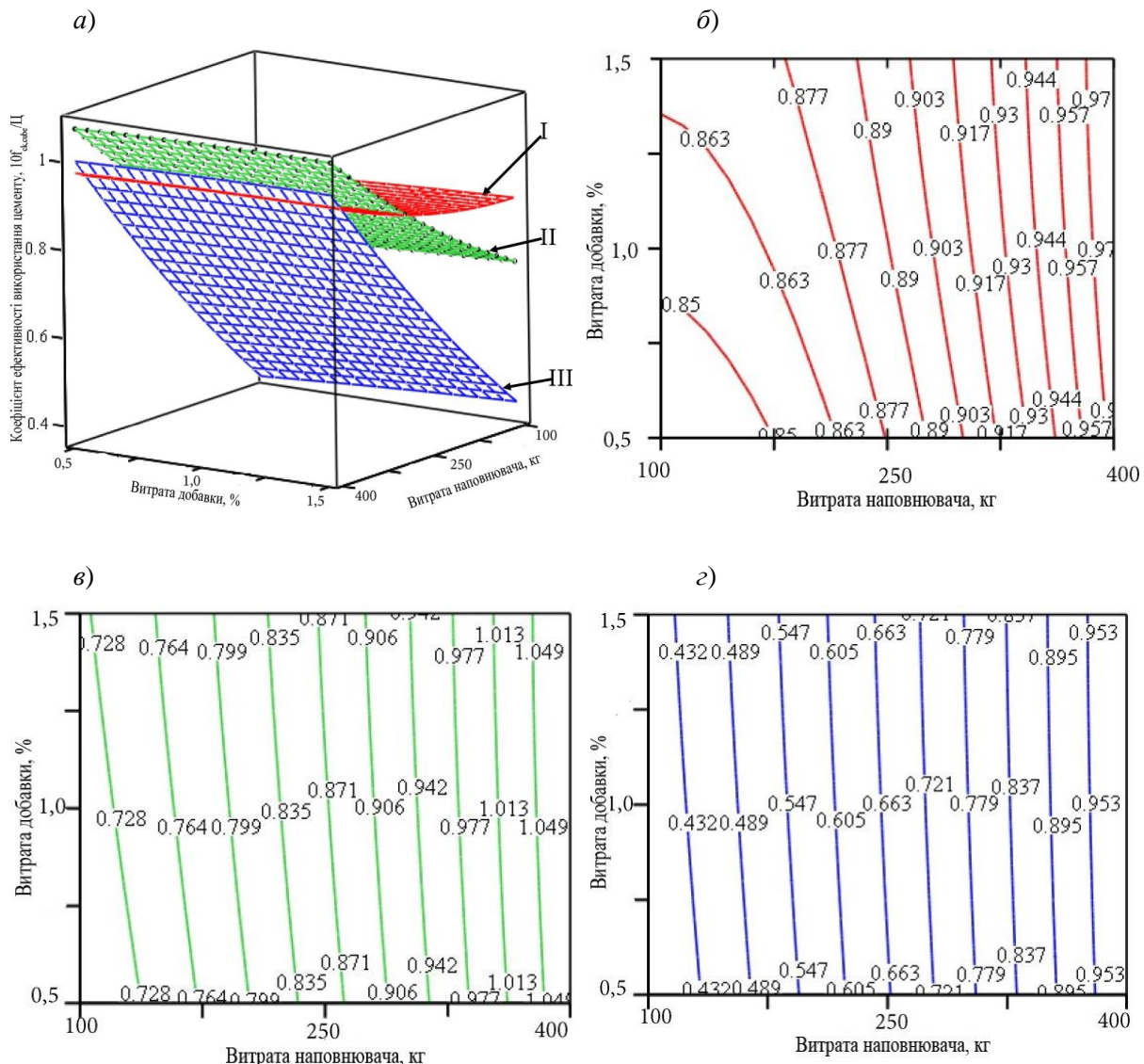


Рис. 2. Залежності коефіцієнта ефективності використання цементу від варійованих факторів:

- а) ізополя коефіцієнта ефективності використання цементу:
 I – при витраті цементу 190 кг на кубометр бетонної суміші;
 II – теж саме при 140 кг; III – теж саме при 90 кг;
 б) ізолінії коефіцієнта ефективності використання цементу
 при витраті цементу 190 кг на кубометр бетонної суміші;
 в) теж саме при 140 кг; г) теж саме при 90 кг

За результатами аналізу поданих на рис. 1 та рис. 2 графічних залежностей величин, що оптимізуються від варійованих факторів можна визначити наступні закономірності. Міцність бетону в найбільшій мірі залежить від витрати цементу в складі бетонної суміші і суттєво збільшується в міру збільшення його вмісту в досліджуваних межах (див. рис. 1, а). Але при максимальному вмісті цементу в складі бетонної суміші міцність бетону в міру збільшення вміс-

ту наповнювача в складі бетонної суміші збільшується в значно меншій мірі, ніж при мінімальному вмісті цементу в досліджуваних межах. Міцність бетону, а відповідно і коефіцієнт ефективності використання цементу, при збільшенні вмісту наповнювача в досліджуваному діапазоні зростає тим більшою мірою, чим менше вміст цементу в складі бетонної суміші. Так, при вмісті цементу в складі бетонної суміші 190 кг/м³ і збільшенні вмісту наповнювача

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

від 100 до 400 кг/м³ міцність бетону, а відповідно і коефіцієнт ефективності використання цементу, збільшується приблизно на 16 % (див. рис. 1, б та рис. 2, б). А при вмісті цементу в складі бетонної суміші 90 кг/м³ і збільшенні вмісту наповнювача в такому ж діапазоні міцність бетону, а відповідно і коефіцієнт ефективності використання цементу, збільшується приблизно в 2,3 рази (див. рис. 1, г та рис. 2, г).

Найбільший коефіцієнт ефективності використання цементу, при будь-якій витраті останнього в розглянутих межах, спостерігається в складах з сумарною витратою цементу і наповнювача близько 500 кг на кубометр бетонної суміші і більше. А приріст коефіцієнта ефективності використання цементу найбільший (приблизно в 2,2 рази) в складах з витратою цементу 90 кг/м³ і збільшенні витрати наповнювача від 100 до 400 кг на кубометр бетонної суміші (див. рис. 2, а та рис. 2, г).

Пояснити отримані результати можна з позицій структурних теорій міцності бетону. У складах з витратою наповнювача 100 кг на кубометр бетонної суміші, навіть при витраті цементу 190 кг, а тим більше 90 кг на кубометр бетонної суміші, недостатня кількість найбільш дрібної складової. В результаті нераціонального зернового складу компонентів неможливо отримати його щільну упаковку, отже, бетон має підвищену дефектність структури. Це призводить до суттєвої концентрації напружень біля цих дефектів структури і руйнування при менших зовнішніх навантаженнях, ніж в бетонах з витратою наповнювача 400 кг на кубометр бетонної суміші. В останньому випадку зерновий склад компонентів бетонної суміші близький до раціонального, отже, дефектність структури і концентрація напружень значно менше. Тому міцність, і коефіцієнт ефективності використання цементу в цих бетонах вище, ніж в складах з витратою наповнювача близько 100 кг на кубометр бетонної суміші.

Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведених досліджень та застосування математичного моделювання експерименту з оптимізації таких параметрів, як міцність бетону та коефіцієнт ефективності використання цементу, визначені основні закономірності підвищення ефективності використання цементу при утилізації в бетонах місцевих вто-

ринних продуктів промисловості, а саме введення в якості дрібнозернистої добавки в бетонні відходи збагачення залізних руд ГЗК. Встановлено, що отримати необхідну низьку міцність бетону при значно меншій витраті цементу можна при забезпеченні раціонального зернового складу компонентів бетонної суміші.

Склади бетонних сумішей з високим коефіцієнтом використання цементу досліджуваного діапазону можна використовувати тільки в неармованих залізобетонних конструкціях. Наприклад, відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.6-108: 2010 року для влаштування фундаментів, стін підвалів стандартні фундаментні блоків не армуються і повинні мати міцність із забезпеченістю 95 % від 3,5 до 15 МПа, отже, досить середньої міцності кубика з розміром сторони 10 см від 5 до 20 МПа. Значні обсяги бетону середньої міцністю близько 5 МПа потрібні також для підстилаючих шарів під фундаменти, плити перекриттів при безопалубочному їх пристрої в підземних поверхах і деяких інших аналогічних конструкціях. При проектуванні складів такого бетону необхідно використовувати отримані результати досліджень, забезпечуючи економію цементу та утилізуючи значну кількість дрібнозернистих вторинних продуктів промисловості.

Висновки

Склади бетону середньої міцності менше 20 МПа з підвищеним коефіцієнтом ефективності використання цементу необхідно отримувати з введенням необхідної кількості дрібнозернистого наповнювача з вторинних продуктів промисловості. Для забезпечення підвищеного коефіцієнта ефективності використання цементу необхідно, щоб сумарний вміст цементу і дрібнозернистого наповнювача становив 500...550 кг на кубометр бетонної суміші.

Реалізація запропонованих складів забезпечує істотну економію цементу і утилізацію значної кількості вторинних продуктів промисловості. Отже, таким чином можна успішно вирішувати актуальні проблеми зниження енергоємності бетону, зменшувати забруднення навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97.
- Erdem, T. K., & Kirca, Ö. (2008). Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1477-1483.
- Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-92.
- Shetty, K. K., Nayak, G., & Vijayan, V. (2014). Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting concrete. *European Scientific Journal*, 10(21), 168-176.
- Shishkin, A., Netesa, N., & Scherba, V. (2017). Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6), 11-16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109977
- Virovoi, V., Korobko, O., Zavoloka, M., & Koçurubenko, O. (2017). Structural material science. *Meridian Ingeresc*, 2, 26-30.
- Vurovoy, V., Korobko, O., & Ielkin, O. (2017). Technological events in structural evolution of building composites. *MATEC Web of Conferences (Vol. 116, p. 01021)*. *EDP Sciences*, 1-6.
- Баженов, С. Л. (2014). *Механика и технология композиционных материалов*. Москва: ИД Интеллект.
- Вандоловський, О. Г., & Чайка, В. М. (2016). Міцнісні властивості особливодрібнозернистого бетону на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів у ролі заповнювача. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 160, 17-24.
- Власов, А. Н., Карнет, Ю. Н., & Муковникова, И. И. (2017). Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Выровой, В. Н., Коробко, О. А., & Панасюк, В. А. (2016). Многовариантность структуры бетона. *Технологии бетонов*, 5-6, 16-18.
- Дворкін, Л. Й., Житковський, В. В., Марчук, В. В., Степасюк, Ю. О., & Скрипник, М. М. (2017). *Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини*. Рівне: НУВГП.
- Коробко, О. А., Выровой, В. Н., & Рожнюк, Е. В. (2015). Структурная организация бетона на различных уровнях неоднородностей. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 57, 213-219.
- Краснюк, А. В., Момот, В. О., & Нікіфорова, Н. А. (2013). Вибір ефективних матеріалів для гідротехнічного бетону. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 12-18.
- Ляшенко, Т. В., & Довгань, А. Д. (2016). Механические свойства мелкозернистого бетона с микрокремнеземом и стеклянной фиброй. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 62, 110-114.
- Нетеса, Н. И. (2015). Проблемы утилизации вторичных ресурсов. *Мости и тоннели: теория, исследования, практика*, 8, 48-56.
- Пушкарёва, К. К., Дворкін, Л. Й., & Градобоев, О. В. (2014). *Енергоресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі*. Київ: Задруга.
- Руденко, Д. В. (2015). Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону. *Наука прогрес транспорту*, 6, 174-182.
- Толстой, А. Д., Лесовик, В. С., Загороднюк, Л. Х., & Ковалева, И. А. (2015). Порошковые бетоны с применением техногенного сырья. *Вестник МГСУ*, 11, 101-109.

M. I. NETESA¹, A. V. KRASNYUK², A. M. NETESA³, N. A. NIKIFOROVA^{4*}

¹ Department of Construction Production and Geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

² Dean of the Faculty industrial and civil construction, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 606 03 99, e-mail krasnyuk@mail.diit.edu.ua ORCID 0000-0002-1400-9992

³ Department of Construction Production and Geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 769 25 51, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

^{4*} Department of Construction Production and Geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 640 68 83, e-mail 2017natanik@gmail.com., ORCID 0000-0003-1922-8614

OPTIMIZATION OF CONCRETE COMPOSITIONS WITH SECONDARY INDUSTRIAL PRODUCTS

Purpose. Analyze scientific publications on the existing problems of environmental pollution by secondary industrial products. Search for ways to solve these issues through the rational use of concrete in construction with additives of secondary industrial products, especially fine-grained ones. Determination of rational compositions of medium-strength concrete with the minimum required consumption of cement and filler from iron ore dressing wastes of mining and processing plants. **Methodology.** To achieve this goal, the experience of improving the structure and properties of concrete by introducing complex additives based on secondary industrial products into its composition is analyzed. The following materials were used for the research: Portland cement CEM 41.7 from Kri-voy Rog; as a large aggregate – crushed granite with a maximum grain size of 20 mm; fine aggregate – river quartz sand; mineral additives – products of concentration of iron ores of the Southern Mining and Processing Plant. The experiment was carried out on certified equipment. Control specimens with a side of 10 cm were formed. The compressive strength of concrete was determined according to a standard procedure. Based on the results of the mathematical analysis, graphical dependences of the change in the optimized characteristics on the variable parameters – the consumption of cement, the products of concentration of iron ores and the plasticizer – were built. **Findings.** Based on the results of testing the samples, the calculation of mathematical models of the experiment was carried out and polynomials of the third degree were obtained for the optimized parameters – the average strength of the samples and the coefficient of efficiency of using cement. The following patterns can be distinguished. The strength of concrete depends to the greatest extent on the consumption of cement in the composition of the concrete mixture and increases significantly with an increase in its content within the studied limits. With an increase in the filler content in the studied range, the strength of concrete, and, accordingly, the coefficient of efficiency of using cement increases with a decrease in the content of cement in the composition of the concrete mixture. **Originality.** The studies carried out make it possible to determine the main regularities of increasing the efficiency of cement use when utilizing local secondary industrial products in concrete, namely, the introduction of iron ore dressing waste from mining and processing plants as a fine-grained additive in concrete. It was found that it is possible to obtain the required low concrete strength with a significantly lower cement consumption by ensuring a rational grain size composition of the concrete mixture components. **Practical value.** When designing concrete compositions with a high coefficient of cement utilization, it is necessary to use the obtained research results, providing cement savings and utilizing a significant amount of fine-grained secondary industrial products.

Keywords: grain size composition of aggregates; waste of iron ore dressing; fine-grained additive; polynomial; mathematical model

REFERENCES

- Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97. (in English)
- Erdem, T. K., & Kirca, Ö. (2008). Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1477-1483. (in English)
- Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-92. (in English)
- Shetty, K. K., Nayak, G., & Vijayan, V. (2014). Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting concrete. *European Scientific Journal*, 10(21), 168-176. (in English)
- Shishkin, A., Netesa, N., & Scherba, V. (2017). Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6), 11-16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109977 (in English)
- Vırovoi, V., Korobko, O., Zavoloka, M., & Kořurubenko, O. (2017). Structural material science. *Meridian In-ghneresc*, 2, 26-30. (in English)
- Vyrovoy, V., Korobko, O., & Ielkin, O. (2017). Technological events in structural evolution of building composites. *MATEC Web of Conferences (Vol. 116, p. 01021)*. EDP Sciences, 1-6. (in English)
- Bazhenov, S. L. (2014). *Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov*. Moskva: ID Intellekt. (in Russian)
- Vandolovskiy, O. H., & Chaika, V. M. (2016). Mitsnisi vlastyosti osoblyvodribnozernystoho betonu na vidkhodakh hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ u roli zapovniuvacha. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, 160, 17-24. (in Ukrainian)
- Vlasov, A. N., Karnet, Yu. N., & Mukovnikova, I. I. (2017). *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy, slozhnykh i geterogennykh sred*. (in Russian)
- Vyrovoy, V. N., Korobko, O. A., & Panasyuk, V. A. (2016). Mnogovariantnost struktury betona. *Tekhnologii betonov*, 5-6, 16-18. (in Russian)
- Dvorkin, L. Y., Zhytkovskiy, V. V., Marchuk, V. V., Stepasiuk, Yu. O., & Skrypnyk, M. M. (2017). *Efektivni tekhnologii betoniv ta rozchyniv iz zastosuvanniam tekhnohennoi syrovyny*. Rivne: NUVHP. (in Ukrainian)

© M. I. Netesa, A. B. Краснюк, A. M. Нетеса, Н. А. Никіфорова, 2021

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Korobko, O. A., Vyrovoy, V. N., & Rozhnyuk, Ye. V. (2015). Strukturnaya organizatsiya betona na razlichnykh urovnyakh neodnorodnostey. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 57, 213-219. (in Russian)
- Krasniuk, A. V., Momot, V. O., & Nikiforova, N. A. (2013). Vybir efektyvnykh materialiv dlia hidrotekhnichnoho betonu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 12-18. (in Ukrainian)
- Lyashenko, T. V., & Dovgan, A. D. (2016). Mekhanicheskie svoystva melkozernistogo betona s mikrokrementzemom i steklyannoy fibroy. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 62, 110-114. (in Russian)
- Netesa, N. I. (2015). Problemy utilizatsii vtorichnykh resursov. *Mosty i tonneli: teoriya, issledovaniya, praktika*, 8, 48-56. (in Russian)
- Pushkarova, K. K., Dvorkin, L. Y., & Hradoboiev, O. V. (2014). *Enerhoresursozberihaiuchi mineralni viazhuchi rehovyny ta kompozytsiini budivelni materialy na yikh osnovi*. Kyiv: Zadruha. (in Ukrainian)
- Rudenko, D. V. (2015). Fyzyko-khimichna modyfikatsiia tsementnoi systemy monolitnoho betonu. *Nauka ta prohres transportu*, 6, 174-182. (in Ukrainian)
- Tolstoy, A. D., Lesovik, V. S., Zagorodnyuk, L. Kh., & Kovaleva, I. A. (2015). Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogennogo syrya. *Vestnik MGSU*, 11, 101-109. (in Russian)

Надійшла до редколегії 22.02.2021.

Прийнята до друку 22.03.2021.