

УДК 648.33

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ
ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ ДЛЯ ДОРОЖНЬОГО БУДІВНИЦТВА**

Доктори техн. наук І. П. Гамеляк, А. Г. Шургая,
кандидати техн. наук Я. М. Якименко, Н. П. Чиженко

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
ЦЕМЕНТОБЕТОНОВ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Доктора техн. наук И. П. Гамеляк, А. Г. Шургая,
кандидаты техн. наук Я. Н. Якименко, Н. П. Чиженко

**MATHEMATICAL MODELS OF THE PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CEMENT –
CONCRETE FOR ROAD CONSTRUCTION**

Dr. sc. sciences I.P. Gameliak, A.G. Shurgaya,
phd. tehn. J. M. Jakymenko, N. P. Chyzhenko

Ми представляємо математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва, які отримано на основі факторного планування експерименту і результатів попередніх досліджень. Досліджувався вплив кількості цементу і комплексної добавки на технологічні, фізико-механічні властивості і вартість дорожнього цементобетону. На основі запропонованої функції цілі та фізико-механічних даних у якості обмежень виконано оптимізацію складу дорожнього високоміцного цементобетону.

Ключові слова: математичні моделі, властивості, оптимізація, високоміцний бетон.

Мы представляем математические модели свойств высокопрочных цементобетонov для дорожного строительства, которые получены на основе факторного планирования

эксперимента и результатов предыдущих исследований. Исследовалось влияние количества цемента и комплексной добавки на технологические, физико-механические свойства и стоимость дорожного цементобетона. На основе предложенной функции цели и физико-механических данных в качестве ограничений выполнена оптимизация состава дорожного высокопрочного цементобетона.

Ключевые слова: математические модели, свойства, оптимизация, высокопрочный бетон.

We present the mathematical models of the properties of high-strength cement-concrete for road construction, which were received at the basis of factorial experiment planning and results from previous studies. Determination of the optimum compositions of cement concrete with a complex additive was carried out according to the following criteria: preservation of workability of concrete mixture over time, the contents of the entrained air, compressive strength and flexural strength, modulus of elasticity and economic efficiency. The results obtained became the basis for optimizing the composition of high-strength concrete used for construction of roads. The strength of road concrete tensile bending is the property that determines the fracture toughness, endurance and durability. There fore, the main criterion of optimization adopted by the tensile strength of concrete tensile bending. As constraints taken technological, physical, and mechanical properties of high-strength concrete and objective function of the cost of cement-concrete mixtures. As a result of optimization, is the optimal composition of the concrete for subsequent implementation in the construction of road pavement.

Keywords: mathematical model properties optimization, high-strength concrete.

Вступ. На сьогодні відомо багато методів проектування складу цементобетону. Змінюючи склад, технологію отримання цементобетону, структуру композитного матеріалу, можна отримати матеріал із заданими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. При цьому кількість варіантів складів, які відповідають вимогам, може бути достатньо великою. Визначити кількість можливих варіантів враховуючи вміст щебеню двох фракцій, піску, цементу і води становить $n!$ при n яти складових цементобетону:

$$5! = 120,$$

де $n!$ – кількість факторів, які приймаються в розрахунках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення раціонального складу суміші можливо з застосуванням сучасних методів планування експерименту і широкого використання математичних методів моделювання, які дають можливість оцінювати і порівнювати між

собою [1-3]. Загальна кількість технологічних факторів, які впливають на властивості цементобетону, може бути достатньо великою, тому необхідно виявити найбільш істотні фактори та цілеспрямовано діяти за допомогою них для досягнення заданих властивостей цементобетону або отримання складів мінімальної вартості при задоволенні технології та прийнятті нормативних вимог у якості обмежень. Для успішного використання математичних моделей велике значення має правильний вибір технологічних факторів, вибір критеріїв оптимізації та встановлення обмежень для цементобетону як багатокомпонентної системи [4-8].

Метою дослідження є встановлення математичних моделей властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва на основі експериментальних даних.

Задачі дослідження:

1) спланувати факторний експеримент з метою оцінки впливу вмісту цементу

і комплексної добавки на технологічні і фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону;

2) на основі факторного планування експерименту і результатів попередніх досліджень отримати математичні моделі технологічних, фізико-механічні властивостей дорожнього цементобетону;

3) визначити адекватність моделей;

4) на основі запропонованої функції цілі та обмежень виконати оптимізацію складу дорожнього цементобетону.

Об'єкт дослідження. Склади цементобетону з комплексною добавкою ШАГ-ПА [9, 10]. Під час проведення досліджень використовували такі матеріали: портландцемент Кам'янець-Подільський – ПЦ І – 500 Р-Н; пісок річковий – $M_{кр} = 1,4$, насипна щільність – 1551 кг/м^3 (730 кг); щебінь гранітний фракції 5-10 мм –

насипна щільність 1430 кг/м^3 , середня щільність 2583 кг/м^3 , пустотність – 44,5 %, (360 кг); і фракції 10-20 мм – насипна щільність 1380 кг/м^3 , середня щільність 2571 кг/м^3 , пустотність – 46,3 % (840 кг).

Основна частина дослідження. Визначення оптимальних складів цементних бетонів із комплексною добавкою проводилось за такими критеріями: збереження легкоукладальності бетонної суміші з часом, вміст залученого повітря, міцності на стиск і згин, модуль пружності та економічної ефективності. Дослідження виконували з використанням двофакторного плану експерименту. Фактори та інтервали їх варіювання наведено в таблиці. Проведено статистичний аналіз та отримано експериментально статистичні моделі за допомогою програми STATISTICA, які наведено на рис. 1-5.

Таблиця

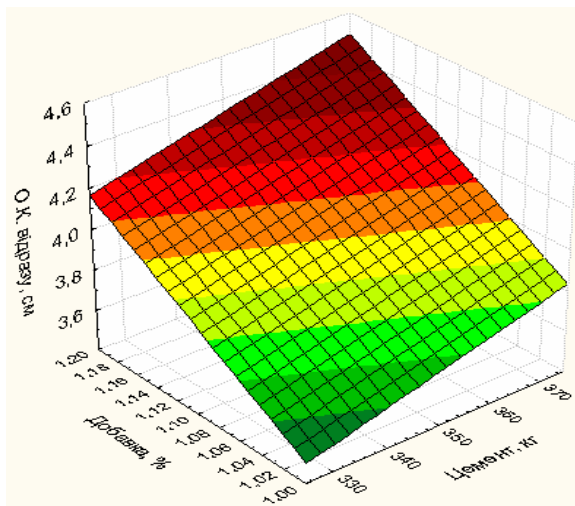
Фактори та інтервали їх варіювання

Номер фактора	Фактор		Значення фактора		
	натуральний вид	кодований вид	-1	0	+1
1	Витрата в'язучого, кг/м^3	X_1	325	350	375
2	Витрата комплексної добавки ШАГ-ПА, %	X_2	1,0	1,1	1,2

Важливим у технології будівництва монолітних цементобетонних покриттів є забезпечення збереження технологічних властивостей бетонної суміші (не менше 2 годин). Подано математичні моделі впливу комплексної добавки на збереження легкоукладальності бетонної суміші протягом 2 годин (рис. 1) і вмісту залученого повітря (рис. 2). Марка суміші з легкоукладальності становила П1.

За результатами, наведеними на рис. 3, а, всі склади характеризуються високою ранньою міцністю, тому нарізання деформаційних швів слід виконувати через 5...6 годин після укладання залежно від температури повітря.

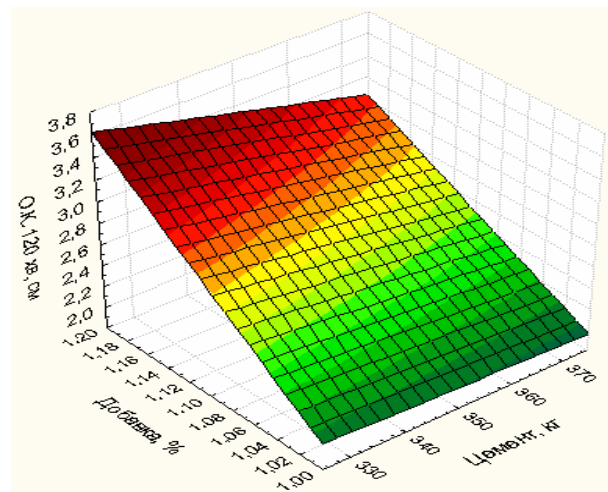
Модуль пружності для дорожнього цементобетону повинен складати $37-42 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ (при 5-6 % залученого повітря). Всі склади задовольняють дану вимогу (рис. 4, б).



а)

$$OK_0 = -2 + 0,01 \cdot X_1 + 3,33 \cdot X_2 + 1,87 \cdot E - 15 \cdot X_1^2 + 5,91 \cdot E - 14 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,18 \cdot E - 11 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,83$$

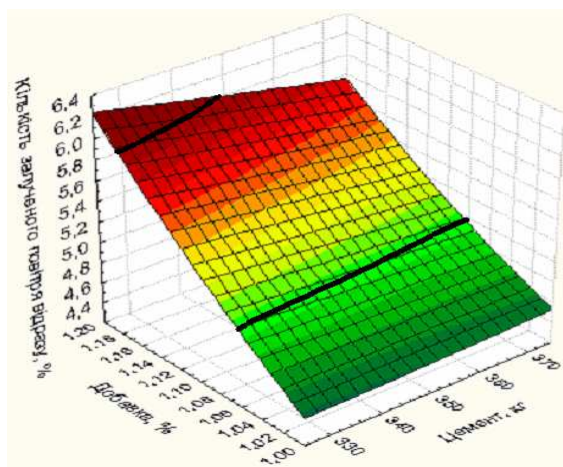


б)

$$OK_{120хв} = -21,58 + 0,05 \cdot X_1 + 24,17 \cdot X_2 + 1,57 \cdot E - 14 \cdot X_1^2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,96 \cdot E - 10 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,94$$

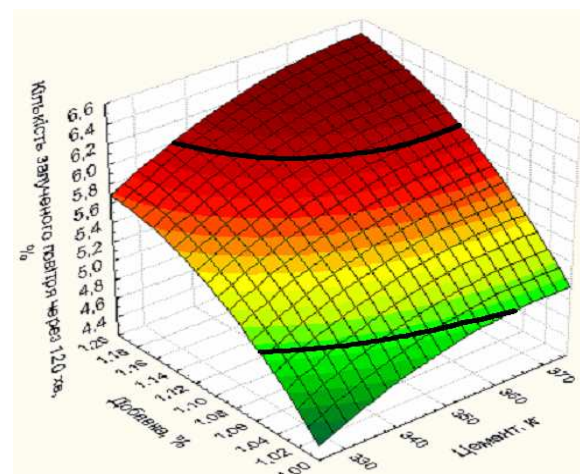
Рис. 1. Математична модель осадки конуса: а – відразу, б – через 120 хв



а)

$$V_0 = -10,98 + 0,05 \cdot X_1 + 7,68 \cdot X_2 + 1,07 \cdot E - 5 \cdot X_1^2 - 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 + 8,67 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,94$$

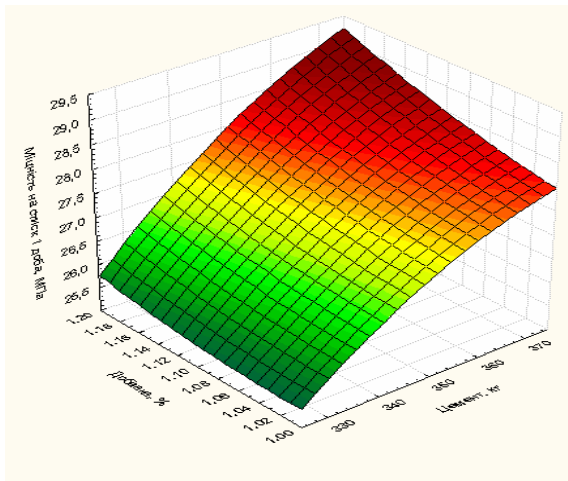


б)

$$V_{120} = -68,78 + 0,19 \cdot X_1 + 62,85 \cdot X_2 - 0,0003 \cdot X_1^2 + 0,02 \cdot X_1 \cdot X_2 - 28,5 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,86$$

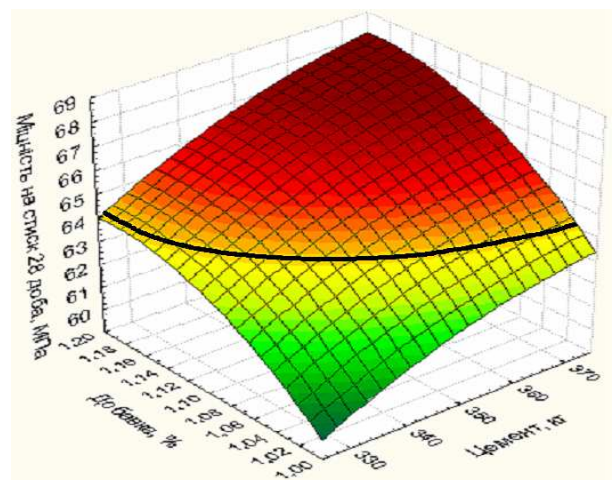
Рис. 2. Математична модель вмісту залученого повітря в суміші:
а – відразу; б – через 120 хв



а)

$$R_{ст}^{100} = -24,83 + 0,39 \cdot X_1 - 53 \cdot X_2 - 0,0006 \cdot X_1^2 + 0,09 \cdot X_1 \cdot X_2 + 11,67 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,93$$

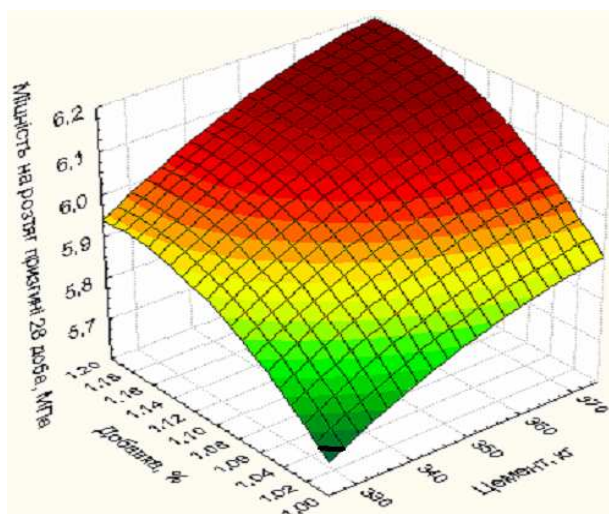


б)

$$R_{ст}^{28} = -226,21 + 0,66 \cdot X_1 + 272,67 \cdot X_2 - 0,0009 \cdot X_1^2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 - 123,33 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,89$$

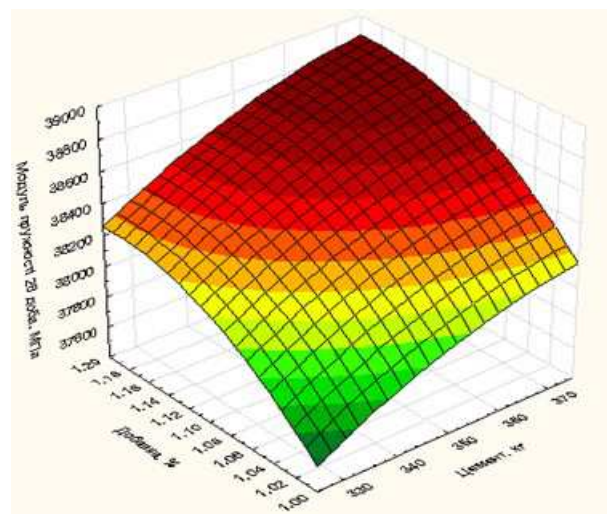
Рис. 3. Математична модель міцності при стиску:
а – нарізання швів (1 доба); б – марочна міцність на стиск В50 (28 діб)



а)

$$R_{зг}^{28} = -12,29 + 0,04 \cdot X_1 + 17,11 \cdot X_2 - 5,82 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2 + 0,0032 \cdot X_1 \cdot X_2 - 7,67 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,92$$

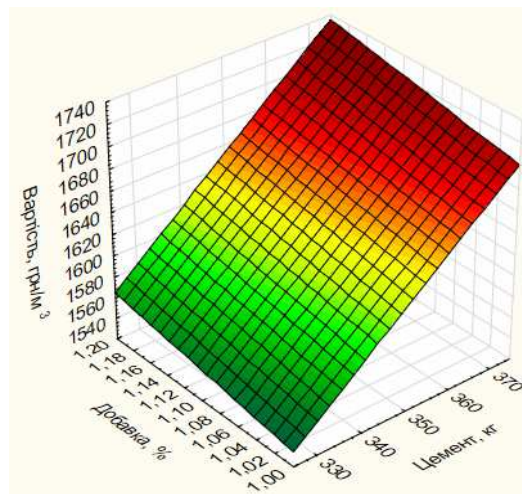


б)

$$E_{28} = -10631,36 + 113,87 \cdot X_1 + 45762,98 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_1^2 + 4,16 \cdot X_1 \cdot X_2 - 19861,81 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,92$$

Рис. 4. Математична модель: а – марочної міцності на розтяг при згині ($B_{бтб} 4,4$);
б – модуля пружності



$$C_{ЦБС} = 201,98 + 4,28 \cdot X_1 - 0,60 \cdot X_2 - 0,002 \cdot X_1^2 + 0,47 X_1 \cdot X_2 + 0,17 \cdot X_2^2; R^2 = 0,99$$

Рис. 5. Математична модель вартості цементобетонної суміші з комплексною добавкою

Проведено техніко-економічне обґрунтування отримання високоміцного дорожнього цементобетону [11]:

$$C_{ЦБС} = C_{щ} V_{щ} + C_n V_n + C_{Ц} V_{Ц} + C_D V_D + C_{тех} + C_{пер} \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де $C_{ЦБС}$ – питома вартість 1 м³ цементобетонної суміші, грн;

$C_{щ}$, C_n , $C_{Ц}$, C_D – вартість щебеню, піску, цементу і добавки, грн/м³ (із урахуванням цін на будівельні матеріали станом на 01.02.2017 р.);

$V_{щ}$, V_n , $V_{Ц}$, V_D – кількість щебеню, піску, цементу і добавки, яка необхідна для приготування 1 м³ цементобетону;

$C_{тех}$ – вартість технології приготування цементобетонної суміші (загальновиробничі та адміністративні витрати, амортизація обладнання, прибуток, ПДВ тощо);

$C_{пер}$ – вартість технології влаштування цементобетонного покриття (доставка суміші, заробітна плата, вартість машин і механізмів тощо).

Вартість високоміцного цементобетону не враховує витрати на доставку суміші.

Отримані результати досліджень стали основою для оптимізації складів цементобетону, що використовується для будівництва покриття доріг. Задачу

оптимізації сформульовано як задачу пошуку оптимальних складів бетонів із урахуванням реологічних властивостей сумішей, напружено-деформованого стану цементобетонів у конструкції та економічної ефективності.

Міцність дорожнього бетону на розтяг при згині – це властивість, яка визначає їх тріщиностійкість, витривалість і довговічність. Тому критерієм оптимізації прийнято границю міцності цементобетону на розтяг при згині: $B_{btb} \approx 4,4$.

Залежно від категорії дороги регламентується мінімально допустимий клас міцності бетону на стиск. Аналізуючи попередні результати досліджень міцності цементобетону на стиск, прийнято граничне значення класу міцності B50.

Бетонна суміш повинна зберігати свою легкоукладальність протягом двох годин і становити

$$1,0 \leq OK \leq 4,0. \quad (2)$$

Для забезпечення марки з морозостійкості цементобетон для будівництва покриття доріг повинен містити залучене повітря, вміст якого регламентовано в [12]:

$$5,0 \leq V \leq 6,0. \quad (3)$$

Гранична вартість складів дорожніх високоміцних цементобетонів становить 1700 грн/м³. Оптимізація складів цементобетонів для покриття доріг представлена на рис. 6.

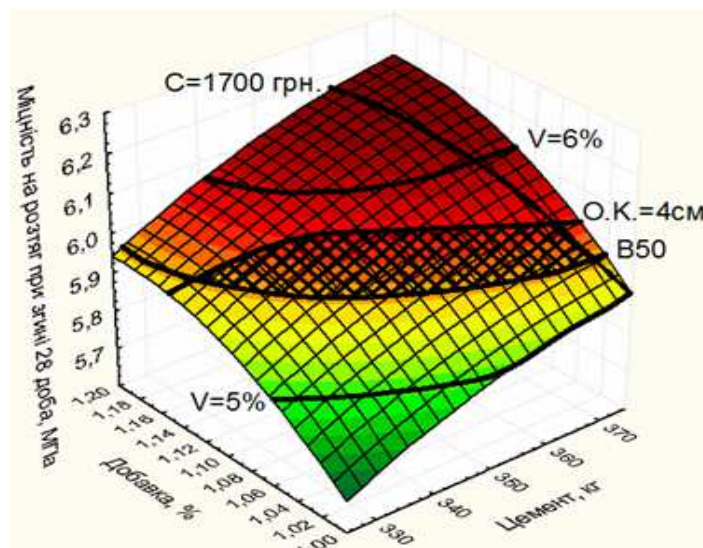


Рис. 6. Оптимізація складів високоміцних дорожніх цементобетонів

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Внаслідок виконання всіх етапів (підбір складу, виконання статистичної обробки даних) отримання математичних моделей технологічних, фізичних, механічних властивостей високоміцного цементобетону з використанням функції цілі у вигляді вартості цементобетонної суміші (1) та прийнятих фізико-механічних даних як обмежень виконано оптимізацію складів високоміцного цементобетону. Рекомендовано впроваджувати оптимальний склад з

легкоукладальністю ОК 1...4 см дорожнього цементобетону класу міцності на стиск С 45/50 за роботою [13], В 50, за роботою [14], на розтяг при згині B_{btb} 5,2, маркою з морозостійкості F200, водонепроникності W10 при витраті в'язучого – від 340 до 360 кг/м³ при середньому значенні 350 кг/м³ і комплексної добавки ШАГ-ПА від 1,05...1,12 при середньому значенні 1,1 % маси в'язучого. Дані склади рекомендуються для влаштування покриття жорсткого типу автомобільних доріг та аеродромів.

Список використаних джерел

1. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Я. Керш [и др.]. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
2. Вознесенский, В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К., 1989. – 328 с.

3. Дворкін, Л. Й. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів [Текст]: навч. посібник / Л.Й. Дворкін, В.І. Гоц, О.Л. Дворкін. – К.: Основа, 2014. – 304 с.
4. Babak, Golchin. Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. /Meor Othman Hamzah, Mohd Rosli Mohd Hasan // Construction and Building Materials. – 2017 – Vol. 141. – P. 578-588.
5. Гамеляк, І. П. Оптимізація складу зернистих сумішей методами лінійного програмування [Текст] / І.П. Гамеляк // Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку: зб. наук. праць. – К.: УТУ, 1998. – С. 205-208.
6. Математичне моделювання та оптимізація будівельних композитів [Текст]: навч. посібник // С.Й. Солодкий, І.Д. Пелешко, Р.М. Русин [та ін.]. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 92 с.
7. Xudong, Chen. Analysis of mechanical properties of concrete cores using statistical approach / Shengxing Wu, Jikai Zhou // Magazine of Concrete Research. – 2013. – Vol. 65. – Issue 24. – P. 1463-1471.
8. Композиционные стротельные материалы и конструкции пониженной материалоемкости // В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев [и др.]. – К.: Будівельник, 1991. – 145 с.
9. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону [Текст] / І. П. Гамеляк, А. Г. Шургая, Я. М. Якименко [та ін.] // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2015 – № 85. – С. 38-49.
10. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства [Текст] / А.Г. Шургая, И.П. Гамеляк, Я.Н. Якименко [та ін.] // Автомобильные дороги и мосты: науч.-техн. журнал. Республика Беларусь. – 2015. – № 2 (16).
11. Гамеляк, І. П. Математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для дорожніх та аеродромних покриттів [Текст] / І.П. Гамеляк, А.М. Дмитриченко // Автомобільні дороги. – 2015. – № 1-2 (243-244). – С.75-80.
12. ВБН В.2.3.–218–008–97. Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. – К.: Укравтодор, 1997. – 218 с.
13. DIN EN 206-1:2001. Бетон. Частина 1. Технічні вимоги, експлуатаційні характеристики, виробництво й відповідність вимогам.
14. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності.

Гамеляк Ігор Павлович, д-р техн. наук, професор кафедри «Аеропорти» Національного транспортного університету. Тел.: (050)352-41-24. E-mail: gip65@mail.ru.

Шургая Анзор Гівієвич, начальник лабораторії ТОВ «Мостогаїн 112». Тел.: (098)440-61-93.

Якименко Ярослав Миколайович, канд. техн. наук, головний інженер ТОВ «Мостогаїн 112». Тел.: (095)378-06-73. E-mail: yakymenko@mail.ru.

Чиженко Наталія Петрівна, асистент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Національного транспортного університету. Тел.: (050)735-50-80. E-mail: chyzhenko_np@ukr.net.

Gameliak Igor, Doctor of Engineering Science, Professor, Airports department, National Transport University. Tel.: (050)352-41-24. E-mail: gip65@mail.ru.

Shurgaya Anzor, Head of Laboratory, Mostozahin112. Tel.: (098)440-61-93.

Jakymenko Jaroslav, phd. tehn., chief Engineer, Mostozahin112. Tel.: (095)378-06-73. E-mail: yakymenko@mail.ru.

Chyzhenko Natalia, Road-Building Materials and Chemistry, National Transport University Department. Tel.: (050)735-50-80. E-mail: chyzhenko_np@ukr.net.

Стаття прийнята 10.04.2017 р.