

УДК 691.32

Кровяков С. О.<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, <http://orcid.org/0000-0002-0800-0123>

Ігнатенко А. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0001-9222-1051>

Фіногенов О. І.<sup>3</sup>, <http://orcid.org/0009-0005-3631-4786>

Лапіна О. І.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0002-4081-8187>

<sup>1</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури (ОДАБА), м. Одеса, Україна

<sup>2</sup>Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), м. Черкаси, Україна

<sup>3</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю «Ростдорстрой» (ТОВ «РДС»), м. Одеса, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ФІБРОБЕТОНУ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

### Анотація

**Вступ.** Забезпечення необхідного рівня міцності, морозостійкості та зносостійкості дозволяє досягнути високої довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів. Одним з ефективних методів покращення означених фізико-механічних показників є дисперсне армування. Проте в реальних економічних умовах важливо оцінювати ефективність конкретного типу дисперсного армування також з врахуванням його впливу на собівартість матеріалу. Використання комплексу експериментально-статистичних моделей, побудованих за результатами реалізації планованого експерименту, дозволяє проводити обґрунтований вибір оптимальних складів фібробетонів для покриттів автодоріг.

**Проблематика.** Ефективність використання дисперсного армування суттєво залежить від властивостей бетонної матриці, на які впливає склад бетону, технологія його приготування тощо. Кількість дисперсної арматури, яка забезпечує найкраще зростання міцності бетону, не завжди є раціональною з економічної точки зору. До бетонів покриттів автомобільних доріг висувається низка вимог щодо міцності, морозостійкості, стиранистості. Забезпечити відповідність цим вимогам можна за різних варіантів складів бетонів і фібробетонів, кожен з яких буде мати свої особливості. Тому задача оптимізації складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття з врахуванням сучасних вимог до матеріалу та економічних чинників є актуальною.

**Мета.** Визначення оптимального складу фібробетону, який задовольняє вимогам до матеріалу жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг Іа категорії та має найменшу собівартість.

**Результати.** За оптимальним планом проведений експеримент, в якому варіювалися 3 чинники складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття: кількість цементу від 300 кг/м<sup>3</sup> до 380 кг/м<sup>3</sup>, кількість поліпропіленової фібри від 0 кг/м<sup>3</sup> до 3,0 кг/м<sup>3</sup>, кількість пластифікатора лігносульфонатного типу від 0,6 % до 1,0 % від маси цементу. Розраховано комплекс експериментально-статистичних моделей, які описують вплив варіюваних чинників на міцність бетону на стиск, міцність на розтяг при згині, морозостійкість, стиранистість і собівартість 1 м<sup>3</sup>. З використанням даних моделей проведено вибір оптимального складу фібробетону, який задовольняє вимогам до матеріалу покриттів доріг Іа категорії та має мінімальну собівартість. Для реалізації вибору за комплексом ЕС-моделей було побудовано 17 двофакторних діаграм типу «квадрат» з осями Х<sub>2</sub> (кількість фібри) і Х<sub>3</sub> (кількість пластифікатора). Квадрати будували за 17 рівних зафіксованих рівнях чинника х<sub>1</sub>, що відповідає всьому діапазону варіювання кількості цементу з кроком 5 кг/м<sup>3</sup>. Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше здійснити вибір оптимального рішення. Обрано склад фібробетону, що містить поліпропіленову фібру у кількості 0,36 кг/м<sup>3</sup>, що менше за кількість, яка забезпечує найвищі показники міцності, морозостійкості та зносостійкості. Проте з врахуванням особливостей роботи дисперсної арматури в бетонній матриці та з врахуванням ринкових цін на компоненти бетонної суміші саме такий склад є оптимальним.

**Висновки.** З використанням комплексу експериментально-статистичних моделей графічним методом обрано оптимальний склад фібробетону жорсткого дорожнього покриття. Обраний склад забезпечує необхідні рівні міцності, морозостійкості та стиранисті для покриттів доріг Ia і має мінімальну собівартість.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, зносостійкість, жорсткий дорожній покриття, експериментально-статистичне моделювання, міцність, морозостійкість, оптимізація, поліпропіленова фібра.

### **Вступ**

Застосування жорстких цементобетонних покриттів в Україні було вкрай обмеженою практикою, яка склалася історично. Це пояснюється достатню невисоким навантаження на вісь автомобіля, відносно не великою інтенсивністю руху та доступністю дешевих бітумів в минулі десятиріччя. У другому десятиріччі XXI сторіччя ситуація почала змінюватися і завдяки відчутним експлуатаційним перевагам в умовах великих навантажень все частіше застосовуються цементобетонні покриття. Основною перевагою жорстких покриттів перед асфальтобетонними є їх більша довговічність, що обумовлює економічну доцільність використання цементобетонів попре дещо вищу вартість влаштування [1]. Також цементобетонні покриття є стійкими до утворення колій та хвиль, а їх властивості майже не залежать від температурних коливань.

Досвід будівництва та експлуатації автомобільних доріг із цементобетонним покриттям показав високу ефективність застосування фібробетонів для влаштування покриттів [2, 3]. В якості дисперсної арматури в дорожньому будівництві використовують різні типи волокон, але переважно полімерні, сталі, базальтові та скляні [4-6]. Використання сталеві фібри дозволяє суттєво покращити рівень більшості важливих для бетонів дорожніх покриттів фізико-механічних показників. Проте через необхідність використовувати сталі волокна у кількості від 25 м до 100 кг на 1 м<sup>3</sup> суміші такий тип дисперсного армування є дорогим. Тому на практиці більш широко використовують інші типи фібри, насамперед полімерні. Полімерна фібра є ефективною в умовах багаторазового навантаження, що важливо для конструкцій автодоріг [7].

У сучасних умовах фактично всі бетонні і фібробетонні суміші виготовляються з використанням пластифікаторів того чи іншого типу [6, 8]. Проте ефективність пластифікаторів залежить від рецептурно-технологічних особливостей складу бетону, зокрема типу цементу і рухомості суміші [9]. Тому при дослідженні властивостей фібробетонів також важливо враховувати вплив типу і кількості пластифікатора як чинника, що в значній мірі визначає властивості бетонної матриці.

Незважаючи на великий досвід розроблення складу бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів залежно від вимог до матеріалу та використаних матеріалів, для приготування суміші необхідно проводити оптимізацію складу бетону для кожного конкретного типу конструкції [10, 11]. При вирішенні задачі пошуку оптимального складу композиційного матеріалу, включаючи бетон і фібробетон, ефективним є використання методів планування експерименту й експериментально-статистичного моделювання [11, 12]. Застосування означених методів дозволяє отримати комплекс адекватних експериментально-статистичних (ЕС) моделей, що відображають вплив варіюваних досліджених чинників складу композиційного матеріалу на його експериментально визначені властивості. За даним комплексом проводиться багатокритеріальна оптимізація складу композиційного матеріалу.

### **Матеріали та методика дослідження**

Експериментальні дослідження властивостей бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів проводили за D-оптимальним 15-ти точковим планом [11, 12]. Варіювали 3 наведені нижче чинники складу бетонів:

X<sub>1</sub>, кількість цементу ПЦ II/A-III 500 P-H, від 300 кг/м<sup>3</sup> до 380 кг/м<sup>3</sup>;

X<sub>2</sub>, кількість поліпропіленові фібри X Mesh (довжина волокон 39 мм, еквівалентний діаметр 0,45 мм), від 0 кг/м<sup>3</sup> до 3,0 кг/м<sup>3</sup>;

Х<sub>3</sub>, кількість пластифікатора Sika® Plastiment®-1230 (виробляється на базі лігносульфонатів), від 0,6 % до 1,0 % від маси цементу.

В якості заповнювачів використовував гранітний щебінь фракції 5-20 мм і митий кварцовий пісок з модулем крупності 2,4.

Усі бетонні суміші мали рівну рухомість S1 при ОК від 2 см до 3 см, що досягалося підбором кількості води при відповідному коригуванні складу бетону. План 3-х факторного експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів наведені в **табл. 1**.

**Таблиця 1**

**План експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів**

| № складу | Рівні варійованих чинників |                        |                                | Склади досліджених бетонів і фібробетонів (кг/м <sup>3</sup> ) |        |       |              |                                |      |
|----------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|-------|--------------|--------------------------------|------|
|          | х <sub>1</sub> , цемент    | х <sub>2</sub> , фібра | х <sub>3</sub> , пластифікатор | Цемент                                                         | Щебінь | Пісок | фібра X Mesh | Пластифікатор Plastiment®-1230 | вода |
| 1        | -1                         | -1                     | -1                             | 300                                                            | 1 230  | 825   | 0            | 1,80                           | 132  |
| 2        | -1                         | -1                     | 1                              |                                                                |        | 840   |              | 3,00                           | 118  |
| 3        | -1                         | 0                      | 0                              |                                                                |        | 833   | 1,5          | 2,40                           | 123  |
| 4        | -1                         | 1                      | -1                             |                                                                |        | 815   | 3,0          | 1,80                           | 138  |
| 5        | -1                         | 1                      | 1                              |                                                                |        | 829   |              | 3,00                           | 126  |
| 6        | 0                          | -1                     | 0                              | 340                                                            | 1 210  | 792   | 0            | 2,72                           | 138  |
| 7        | 0                          | 0                      | -1                             |                                                                |        | 784   | 1,5          | 2,04                           | 142  |
| 8        | 0                          | 0                      | 0                              |                                                                |        | 788   |              | 2,72                           | 136  |
| 9        | 0                          | 0                      | 1                              |                                                                |        | 793   | 3,0          | 3,40                           | 132  |
| 10       | 0                          | 1                      | 0                              |                                                                |        | 788   |              | 2,72                           | 136  |
| 11       | 1                          | -1                     | -1                             | 380                                                            | 1 190  | 751   | 0            | 2,28                           | 149  |
| 12       | 1                          | -1                     | 1                              |                                                                |        | 760   |              | 3,80                           | 142  |
| 13       | 1                          | 0                      | 0                              |                                                                |        | 752   | 1,5          | 3,04                           | 146  |
| 14       | 1                          | 1                      | -1                             |                                                                |        | 746   | 3,0          | 2,28                           | 153  |
| 15       | 1                          | 1                      | 1                              |                                                                |        | 753   |              | 3,80                           | 147  |

Для кожного з досліджених складів бетонів і фібробетонів визначала міцність на стиск і на розтяг при згині згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [13], стійкість до стирання згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009 [14], морозостійкість згідно з [15]. Визначені рівні зазначених фізико-механічних показників, а також розрахована в цінах квітня 2025 року собівартість досліджених бетонів і фібробетонів в 15 контрольних точках, наведені в **табл. 2**.

**Таблиця 2**

**План експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів**

| № складу | Міцність на стиск ( $f_{cm}$ ), МПа | Міцність на розтяг при згині ( $f_{ct,ff}$ ), МПа | Стираність (G), г/см <sup>2</sup> | Морозостійкість (F), цикли | Собівартість (Св), грн/м <sup>3</sup> |
|----------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1        | 47,5                                | 4,61                                              | 0,441                             | F100                       | 2 984,16                              |
| 2        | 51,8                                | 4,92                                              | 0,437                             | F150                       | 3 083,99                              |
| 3        | 51,9                                | 5,05                                              | 0,394                             | F150                       | 3 379,30                              |
| 4        | 52,1                                | 5,02                                              | 0,386                             | F150                       | 3 669,16                              |

| № складу | Міцність на стиск ( $f_{cm}$ ), МПа | Міцність на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ), МПа | Стираність (G), г/см <sup>2</sup> | Морозостійкість (F), цикли | Собівартість (Св), грн/м <sup>3</sup> |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 5        | 53,5                                | 5,22                                             | 0,359                             | F200                       | 3 768,51                              |
| 6        | 58,3                                | 5,40                                             | 0,423                             | F150                       | 3 264,47                              |
| 7        | 57,9                                | 5,57                                             | 0,367                             | F150                       | 3 553,09                              |
| 8        | 60,2                                | 5,93                                             | 0,359                             | F200                       | 3 607,40                              |
| 9        | 61,2                                | 6,01                                             | 0,348                             | F200                       | 3 662,24                              |
| 10       | 59,1                                | 6,12                                             | 0,336                             | F200                       | 3 952,40                              |
| 11       | 56,7                                | 5,82                                             | 0,415                             | F150                       | 3 436,05                              |
| 12       | 63,1                                | 6,00                                             | 0,404                             | F200                       | 3 557,57                              |
| 13       | 65,9                                | 6,32                                             | 0,343                             | F250                       | 3 840,04                              |
| 14       | 61,1                                | 6,23                                             | 0,339                             | F200                       | 4 123,57                              |
| 15       | 66,7                                | 6,57                                             | 0,332                             | F250                       | 4 244,08                              |

Аналіз впливу варійованих чинників на властивості бетонів і фібробетонів, а також більш детальна інформація щодо методів дослідження, наведені в статтях нашого авторського колективу [16, 17].

### Результати досліджень

За наведеними у **табл. 2** даними було розраховано комплекс адекватних експериментально-статистичних (ЕС) моделей [12], що описують вплив варійованих чинників складу на властивості бетонів і фібробетонів:

$$f_{cm} \text{ (МПа)} = 60,24 + 5,67x_1 - 1,38x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,77x_1x_3 + 1,50x_2 - 1,57x_2^2 - 0,46x_2x_3 + 2,10x_3 - 0,74x_3^2. \quad (1)$$

$$f_{c,tf} \text{ (МПа)} = 5,87 + 0,61x_1 - 0,17x_1^2 \pm 0,03x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,24x_2 - 0,09x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,15x_3 - 0,06x_3^2. \quad (2)$$

$$F \text{ (цикли)} = 191 + 30x_1 + 11x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 25x_2 - 14x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 25x_3 - 14x_3^2. \quad (3)$$

$$G \text{ (гр/см}^2\text{)} = 0,358 - 0,018x_1 + 0,010x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,037x_2 + 0,021x_2^2 - 0,002x_2x_3 - 0,007x_3 \pm 0x_3^2. \quad (4)$$

$$Св \text{ (грн/м}^3\text{)} = 3\,608,29 + 231,26x_1 + 1,09x_1^2 + 0,56x_1x_2 + 5,36x_1x_3 + 343,15x_2 \pm 0x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 55,04x_3 - 0,92x_3^2. \quad (5)$$

У ЕС-моделях (1)-(5) чинники  $x_1$ - $x_3$  представлені у нормалізованому діапазоні від -1 до +1 [11, 12].

Відомо декілька методів вибору оптимальних рішень за отриманим комплексом ЕС-моделей, зокрема методів вибору оптимальних складів композитних матеріалів. Основними з них є графічний метод та метод Монте-Карло [12, 18]. Графічний метод є більш наочним, що важливо для реальної інженерної практики.

У даному дослідженні для реалізації вибору за ЕС-модями (1) – (5) було побудовано 17 двофакторних діаграм типу «квадрат» з осями  $X_2$  (кількість фібри) і  $X_3$  (кількість пластифікатора). Квадрати будували при відповідних 17 зафіксованих рівнях чинника  $x_1$  від  $-1$  до  $+1$  з кроком  $0,125$ , що відповідає всьому діапазону варіювання кількості цементу від  $300 \text{ кг/м}^3$  до  $380 \text{ кг/м}^3$  з кроком  $5 \text{ кг/м}^3$ . Тобто  $300 \text{ кг/м}^3$ ,  $305 \text{ кг/м}^3$ ,  $310 \text{ кг/м}^3$  і так далі (рис. 1, рис. 2).

Для задач з 3-ма варійованими чинниками також можливим є вибір оптимальних рішень за тривимірною діаграмою типу «куб», яка охоплює весь 3-х факторний простір експерименту. Проте при одночасному відображенні на діаграмі такого типу ізоперехонь декількох показників завдяки передачі тривимірного простору на площині пошук рішень стає складним і менш точним. Саме за цією причиною в даному дослідженні було застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді набору діаграм типу «квадрат». Така дискретизація має незначний недолік, а саме не розглядаються склади з проміжною кількістю цементу, не кратною  $5 \text{ кг/м}^3$ , проте дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень. У фактичних промислових умовах дискретизація на рівні дозування цементу  $5 \text{ кг/м}^3$  є допустимою.

Жорсткі дорожні покриття використовують переважно на найбільш навантажених дорогах. Відповідно було здійснено пошук оптимальних складів фібробетонів для доріг категорії Іа. З врахуванням вимогам ДБН В.2.3-4:2015 (додаток К) [19] і ДСТУ 8858:2019 [20] якості критеріїв обмеження використовували такі значення фізико-механічних характеристик:

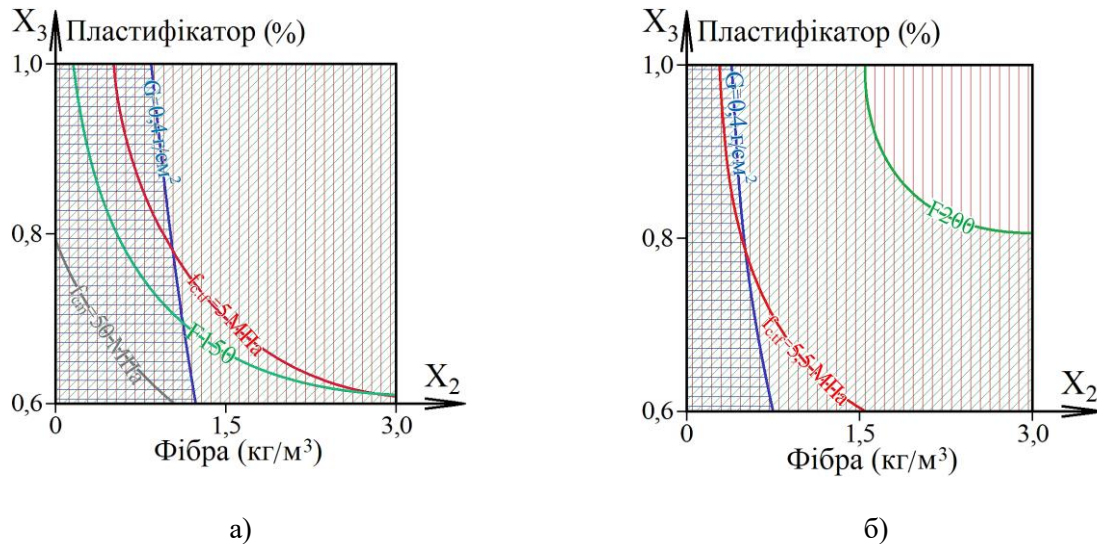
- міцність на стиск  $f_{cm}$  не менш  $50 \text{ МПа}$  (клас В40, С32/40);
- міцність на розтяг при згині  $f_{c,tf}$  не менш  $6,0 \text{ МПа}$  (клас В<sub>нб</sub>4,8);
- морозостійкість F не нижче марки F200;
- стиранисть G не вище  $0,40 \text{ г/см}^2$  (марка за стиранистю G2).

В якості критерію оптимізації використовувала собівартість  $1 \text{ м}^3$  бетону. Даний критерій був обраний з врахуванням того, що в реальній практиці доволі часто виникає питання раціональності використання той або іншої кількості достатньо дорогої фібри. Відомо, що ефективність дисперсного армування суттєво залежить від властивостей бетонної матриці, на які впливає зокрема кількість цементу [7]. Фактично доволі часто кількість дисперсної арматури, яка забезпечує найвищі показники міцності фібробетону, не є раціональною з врахування як вимог до матеріалу відповідної конструкції, так і з врахуванням можливості досягти аналогічного рівня фізико-механічних властивостей при меншій кількості фібри, проте іншому складі бетону.

При виборі рішення ті частини факторного простору діаграм, які не відповідали критеріям обмеження за міцністю, морозостійкістю і стиранистю заштриховували відповідним кольором. Для міцності на стиск — сірим; для міцності на розтяг при згині — червоним; для морозостійкості — зеленим; для стиранисті — синім. Побудовані за ЕС-моделлю (5) ізолінії собівартості  $1 \text{ м}^3$  фібробетону показані у не заштригованих зонах діаграм фіолетовим кольором.

Пошук оптимального складу проводили покроковим аналізом 17-ти побудованих двофакторних діаграм. Як видно з діаграм (рис. 1), що відображають властивості фібробетонів жорстких покриттів при кількості цементу у складі від  $300 \text{ кг/м}^3$  до  $330 \text{ кг/м}^3$ , за даного діапазону жоден склад не забезпечує виконання всього комплексу критеріїв обмеження. На рис. 1 відображені 2-і з 7-ми побудованих діаграм у діапазоні від  $x_1 = -1$  (цементу  $300 \text{ кг/м}^3$ ) до  $x_1 = -0,25$  (цементу  $330 \text{ кг/м}^3$ ). Наприклад як видно з рис. 1. а (мінімальна кількість цементу) навіть за використання максимальної кількості фібри і пластифікатора немає складів фібробетонів, що мають морозостійкість не нижче F200 та міцність на розтяг при згині не нижче  $6 \text{ МПа}$ . За кількості цементу  $330 \text{ кг/м}^3$  (рис. 1. б) вже існує область, що забезпечує морозостійкість F200 і вище, проте жоден склад не забезпечує міцність на розтяг при згині не нижче  $6 \text{ МПа}$ .

На рис. 2 відображені діаграми, які використовували в подальшому аналізі. Як видно з рис. 2. а, при кількості цементу у суміші  $335 \text{ кг/м}^3$  вже існує область рішень, що задовольняє всьому комплексу критеріїв обмеження. У данній області обрано склад № 1, координата якого зазначена на діаграмі жовтим колом з відповідною позначкою «1». Проте даний склад не є оптимальним, тому що собівартість  $1 \text{ м}^3$  фібробетону складу № 1 дорівнює  $3910 \text{ грн/м}^3$ , що обумовлено значною кількістю фібри ( $2,85 \text{ кг/м}^3$ ) і пластифікатора (майже  $1\%$  від маси цементу або  $3,3 \text{ кг/м}^3$ ).



- а)  $x_1 = -1$ , кількість цементу 300 кг/м<sup>3</sup>;  
 б)  $x_1 = -0,25$ , кількість цементу 330 кг/м<sup>3</sup>.

**Рисунок 1** — Відсутні складів фібробетонів, що відповідають висунутим критеріям обмеження при кількості цементу до 330 кг/м<sup>3</sup>

Проведений надалі аналіз діаграм, що відображають властивості фібробетонів при поступовому збільшенні кількості цементу показав (**рис. 2. б – рис. 2. є**), що при зростанні дозування цементу з 335 кг/м<sup>3</sup> до 365 кг/м<sup>3</sup> собівартість 1 м<sup>3</sup> фібробетону, що забезпечує необхідні рівні міцності, морозостійкості та стиранисті, поступово знижується. На **рис. 2** наведені 7-м з 10-ти проаналізованих діаграм (ще 7 були проаналізовані раніше, частина наведена на **рис. 1**). На кожній діаграмі обирали склад із найменшою собівартістю в межах факторного простору відповідної діаграми. А саме:

- склад № 2 (**рис. 2. б**, кількість цементу 340 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 775 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 3 (**рис. 2. в**, кількість цементу 345 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 680 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 4 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 350 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 630 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 5 (**рис. 2. г**, кількість цементу 355 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 595 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 6 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 360 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 580 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 7 (**рис. 2. д**, кількість цементу 365 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 565 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 8 (**рис. 2. е**, кількість цементу 370 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 570 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 9 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 375 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 580 грн/м<sup>3</sup>;
- склад № 10 (**рис. 2. є**, кількість цементу 380 кг/м<sup>3</sup>) має собівартість 3 585 грн/м<sup>3</sup>.

Таким чином, найменшу собівартість має склад № 7, який можна визнати оптимальним. Координати обраного складу у факторному просторі експерименту, повні відомості про склад фібробетону та його прогнозовані властивості наведені в **табл. 3**. Можна відмітити, що даний склад містить кількість поліпропіленової фібри, яка є меншою за ту, що забезпечувала найвищі показники міцності, морозостійкості та зносостійкості (мінімальній стиранисті). Проте з врахуванням особливостей роботи дисперсної арматури в бетонній матриці, яка залежить зокрема від її міцності, а також з врахуванням фактичних ринкових цін на компоненти бетонної суміші саме такий склад є оптимальним.

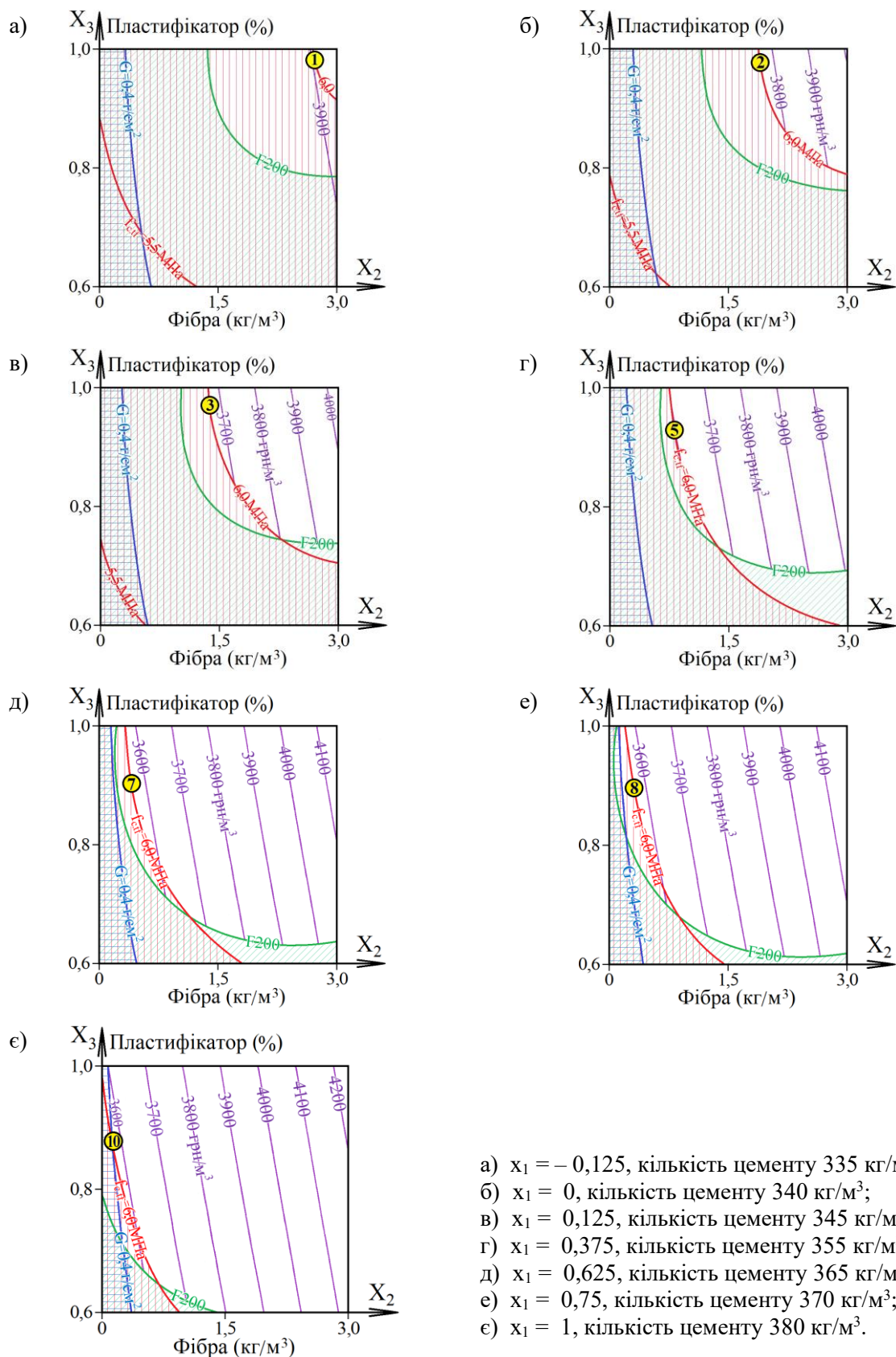


Рисунок 2 — Пошук оптимального складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття

Таблиця 3

## Обраний оптимальний склад фібробетону та його фізико-механічні властивості

| Координати обраного складу у факторному просторі експерименту | Склад фібробетону                                                                                                                                                                                                     | Фізико-механічні властивості, собівартість                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $x_1 = 0,375$<br>$x_2 = -0,740$<br>$x_3 = 0,505$              | Цемент 365 кг/м <sup>3</sup> ;<br>Щебінь 1 198 кг/м <sup>3</sup> ;<br>Пісок 763 кг/м <sup>3</sup> ;<br>Фібра 0,360 кг/м <sup>3</sup> ;<br>Пластифікатор 3,35 кг/м <sup>3</sup> (0,91 %);<br>Вода 143 л/м <sup>3</sup> | Міцність на стиск 62,2 МПа;<br>Міцність на розтяг при згині 6,0 МПа;<br>Морозостійкість F200;<br>Стираність 0,39 г/см <sup>2</sup> ;<br>Собівартість 3565 грн/м <sup>3</sup> |

Також важливо відзначити, що даний обраний склад є оптимальним саме з позиції його застосування в бетонах жорстких дорожніх покриттів доріг Іа категорії з врахуванням собівартості як критерію оптимальності. За інших критеріїв оптимальності, наприклад мінімізації вуглецевого сліду [21], оптимальний склад фібробетону буде іншим.

## Висновки

З використанням комплексу адекватних ЕС-моделей, що описують вплив кількості цементу, фібри і пластифікатора на властивості бетону жорсткого дорожнього покриття, проведена багатокритеріальна оптимізація та обрано оптимальний склад фібробетону для покриттів автомобільних доріг Іа категорії. Даний склад має найменшу собівартість при забезпеченні необхідної міцності, морозостійкості та зносостійкості матеріалу. Застосування фібробетону забезпечує високу довговічність покриття в типових для України кліматичних умовах, що важливо з позиції подальших експлуатаційних витрат.

## Список літератури

1. Цинка А. О., Зеленовський В. А., Райковський В. Ф., Гамеляк І. П., Рибальченко С. А. Перспективи застосування жорсткого дорожнього одягу під час будівництва автомобільних доріг та удосконалення його конструювання і розрахунку. *Дороги і мости*. 2024, Вип. 30. С. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.105>.
2. Talmale P. P., Solanke S., Baktiwale V. V. Application of fiber blended cement in rigid pavement. *AIP Conference Proceedings*, 2024, 2974(1), 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0187804>.
3. Eisa M. S., Basiouny M. E., Youssef A. M. Effect of macro-synthetic fibers on the drying shrinkage performance of rigid pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6, 212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00577-y>.
4. Shakir H. M., Al-Tameemi A. F., Al-Azzawi A. A. A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1895, 012053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012053>.
5. Lau C. K., Chegenizadeh A., Htut T. N. S., Nikraz H. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings*, 2020, 10, 186. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>.
6. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics.. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, 438. P. 362–371. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-036>.
7. Santhosh J. C., Samal S. R., Ganesh V. N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental Investigation on the Effect of Polypropylene Fibers with Respect to the Fatigue Behavior of Rigid Pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, 207, P. 383–395. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-631>.
8. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucińska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 6, (6 (102), P. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111>.
9. Alonso M. M., Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1), P.151–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020>.

10. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. М., Чиженко Н. П. Математичні моделі властивостей високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017, № 169, С. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>.
11. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. К.: Кондор. 2020. 205 с.
12. Ляшенко Т. В., Вознесенский В. А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одеса: *Астропрінт*, 2017. 168 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2010. 43 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
14. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності. Київ, 2010. 9 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
15. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Київ, 1996. 9 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
16. Kroviakov S., Finohenov O., Ihnatenko A. Determination of the effect of the amount of polypropylene fiber and plasticizer on the strength and abrasion resistance of concretes for rigid pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, 2 (6 (134)), P. 53–60 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590>.
17. Лапіна О. І., Фіногенов О. І. Дослідження та експериментально-статистичне моделювання впливу складу на морозостійкість фібробетонів покриттів автомобільних доріг. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2025, 11, С. 98-106. DOI: <http://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-98-106>.
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A., Orešković M. Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. *Materials*, 2023, 16, 2846. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072846>.
19. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. 91 с. [Чинний від 2016-04-01]. (Інформація та документація).
20. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. 16 с. [Чинний від 2020-07-01]. (Інформація та документація).
21. Khan M.Saq., Khan M. Sar., Khan M. I., Al-Nawasir R., Maureira-Carsalade N., Avudaiappan S., Choudhry R.M. Enhancing rigid pavement performance: Experimental study and design optimization of bentonite clay-blended concrete with a focus on durability. *Case Studies in Construction Materials*. 2025, 22, e04641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04641>.

### References

1. Tsynka A. O., Zelenovsky V. A., Raykovskiy V. F., Gamelyak I. P., Rybalchenko S. A. Perspektyvy zastosuvannya zhorstkoho dorozhn'oho odyahu pid chas buduvannya avtomobil'nykh dorih ta udoskonalennya yoho konstruyuvannya i rozrakhunku. [Prospects for the use of rigid road surfaces during the construction of highways and the improvement of its design and calculation]. *Roads and Bridges*. 2024, Issue 30. P. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.105> [in Ukrainian].
2. Talmale P. P., Solanke S., Baktiwale V. V. Application of fiber blended cement in rigid pavement. *AIP Conference Proceedings*, 2024, 2974(1), 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0187804> [in English].
3. Eisa M. S., Basiouny M. E., Youssef A. M. Effect of macro-synthetic fibers on the drying shrinkage performance of rigid pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6, 212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00577-y> [in English].
4. Shakir H. M., Al-Tameemi A. F., Al-Azzawi A. A. A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1895, 012053 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012053> [in English].
5. Lau C. K., Chegenizadeh A., Htut T. N. S., Nikraz H. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings*, 2020, 10, 186. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>.
6. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics.. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, 438. P. 362–371. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36) [in English].

7. Santhosh J. C., Samal S. R., Ganesh V. N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental Investigation on the Effect of Polypropylene Fibers with Respect to the Fatigue Behavior of Rigid Pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, 207, P. 383-395. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31) [in English].
8. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucińska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 6, (6 (102), P. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111> [in English].
9. Alonso M. M., Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1), P.151-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020> [in English].
10. Gameliak I., Shurgaya A., Jakymenko Ja., Chyzhenko N. Matematychni modeli vlastyvostrych vysokomitsnykh betoniv dlya dorozhn'oho budivnytstva [Mathematical models of properties of high-strength concretes for road construction]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2017, No. 169, P. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084> [in Ukrainian].
11. Dvorkin L. Y. Eksperymental'no-statystychni modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv [Experimental and statistical modeling in the design of concrete compositions]. K.: Condor. 2020. 205 p. [in Ukrainian].
12. Lyashenko T. V., Voznesensky V. A. Methodology of recipe and technological fields in computer-aided construction materials science [Metodolohyya retsepturno-tekhnolohycheskykh poley v komp'yuternom stroytel'nom materyalovedenny]. Odesa: Astropoint, 2017. 168 p. [in Ukrainian].
13. DSTU B V.2.7-214:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyy zrazkamy [Building materials. Concretes. Methods of determining strength according to control samples]. Kyiv, 2010. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
14. DSTU B V.2.7-212:2009 Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya styranosti [Building materials. Concretes. Methods for determining abrasion resistance]. Kyiv, 2010. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. DSTU B V.2.7-49-96. Budivel'ni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennya morozostiykosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni [Building materials. Concretes. Accelerated methods of determining frost resistance during repeated freezing and thawing]. Kyiv, 1996. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. Kroviakov S., Finohenov O., Ihnatenko A. Determination of the effect of the amount of polypropylene fiber and plasticizer on the strength and abrasion resistance of concretes for rigid pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, 2 (6 (134)), P. 53–60 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590> [in English].
17. Lapina O. I., Finohenov O. I. Doslidzhennya ta eksperymental'no-statystychni modelyuvannya vplyvu skladu na morozostiykist' fibrobetoniv pokryttiv avtomobil'nykh dorih [Analysis and experimental statistical modeling of the composition effect on the frozen resistance of fibre concretes for road pavements]. *Modern construction and architecture*. 2025, 11, P. 98-106. DOI: <http://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-98-106> [in Ukrainian].
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A., Orešković M. Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. *Materials*, 2023, 16, 2846. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072846> [in English].
19. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction]. Kyiv, 2015. 91 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
20. DSTU 8858:2019. Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy. Tekhnichni umovy [Cement-concrete road mixtures and cement-concrete road. Technical conditions]. Kyiv, 2019. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
21. Khan M. Saq., Khan M. Sar., Khan M. I., Al-Nawasir R., Maureira-Carsalade N., Avudaiappan S., Choudhry R. M. Enhancing rigid pavement performance: Experimental study and design optimization of bentonite clay-blended concrete with a focus on durability. *Case Studies in Construction Materials*. 2025, 22, e04641. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04641> [in English].

**Sergii Kroviakov**<sup>1</sup>, D.Sc., Professor, <http://orcid.org/0000-0002-0800-0123>

**Andrii Ihnatenko**<sup>2</sup>, Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0001-9222-1051>

**Oleg Finohenov**<sup>3</sup>, <http://orcid.org/0009-0005-3631-4786>

**Olga Lapina**<sup>1</sup>, Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0002-4081-8187>

<sup>1</sup>Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA), Odesa, Ukraine

<sup>2</sup>Cherkasy State Technological University (CSTU), Cherkasy, Ukraine

<sup>3</sup>Limited liability company «Rostdorstroy» (LLC «RDS»), Odesa, Ukraine

## **OPTIMISATION OF THE COMPOSITION OF FIBRE-REINFORCED CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT USING A SET OF EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELS**

### ***Abstract***

**Introduction.** The requisite strength, frost resistance, and abrasion resistance allow for a high operating life of concrete for rigid pavements. One of the effective methods to improve these physical and mechanical properties is dispersed reinforcement. However, under real economic conditions, it is important to evaluate the effectiveness of a specific type of dispersed reinforcement, considering its impact on the production cost of the material. The use of a set of experimental-statistical models, which are based on the results of the designed experiment, enables us to make a sound selection of optimal compositions of fibre-reinforced concrete for road pavement.

**Problems.** The effectiveness of dispersed reinforcement significantly depends on concrete matrix properties influenced by the concrete's composition, production technology, etc. The amount of dispersed reinforcement that provides the best increase in concrete strength is not always economically rational. Some requirements are imposed on road pavement concrete regarding strength, frost resistance, and abrasion resistance. Compliance with these requirements can be achieved through various designs of concrete mix and fibre-reinforced concrete, each with its own characteristics. Therefore, optimising the composition of fibre-reinforced concrete for rigid road pavements, taking into account modern material requirements and economic factors, is highly relevant.

**Aim.** The optimisation of fibre-reinforced concrete composition that meets the requirements for the material of rigid road pavement for automobile roads of the category Ia and has a lower production cost.

**Results.** The experiment was conducted according to an optimal plan. Three factors of the rigid road pavement fibre-reinforced concrete composition varied as follows: cement content from 300 kg/m<sup>3</sup> to 380 kg/m<sup>3</sup>, polypropylene fibre content from 0 kg/m<sup>3</sup> to 3.0 kg/m<sup>3</sup>, and lignosulfonate-based plasticiser content from 0.6 % to 1.0 % of the cement mass. The set of experimental-statistical models was computed. The models describe the influence of the varied factors on the concrete's compressive strength, flexural tensile strength, frost resistance, abrasion resistance, and the cost of 1 m<sup>3</sup>. Using these models, the optimal composition of fibre-reinforced concrete was selected. The concrete meets the material requirements for category Ia road pavements and has the minimum cost. To implement the selection based on the set of experimental-statistical models, 17 two-factor «square» type diagrams were made with axes X<sub>2</sub> (fibre quantity) and X<sub>3</sub> (plasticiser quantity). The squares were built at 17 equal fixed levels of factor X<sub>1</sub>, corresponding to the entire range of cement quantity variation with a step of 5 kg/m<sup>3</sup>. Such discretisation allows for a more accurate and precise selection of an optimal solution. The fibre-reinforced concrete composition containing polypropylene fibre in 0.36 kg/m<sup>3</sup> was selected. It is less than the amount that ensures the highest parameters of strength, frost resistance, and abrasion resistance. However, considering the specifics of how dispersed reinforcement functions within the concrete matrix and taking into account the market prices for concrete mix components, this particular composition is optimal.

**Conclusion.** Using the set of experimental-statistical models, the graphic method selects the optimal composition of fibre-reinforced concrete for rigid pavement. The composition guarantees required strength, frost resistance, and abrasion resistance for the category Ia road pavement and has minimal cost.

**Keywords:** road, rigid pavement, polypropylene fibre, optimisation, strength, frost resistance, abrasion resistance, experimental-statistical modelling.