

УДК 666.952

**ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ ФІБРОБЕТОНУ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-
СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

**DESIGNING THE FIBER CONCRETES COMPOSITION
WITH THE USING EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELS**

**Дворкін Л. Й., д.т.н., професор, Бабич Є. М., д.т.н., професор,
Степасюк Ю. О., аспірант, Ковальчук Т. В., аспірант (Національний
університет водного господарства та природокористування, м.Рівне)**

**Dvorkin L. J., doctor of technical sciences, professor, Babich E. M.,
doctor of technical sciences, professor, Stepanyuk Y. O., post-graduate
student, Kovalchuk T. V., post-graduate student (National University of
Water Management and Natural Resources use, Rivne)**

В статті розглянуто комплекс технологічних рішень, що направлені на отримання високоякісного сталевібробетону, а також базальтофібробетону: вибір виду фібри, орієнтація її при ущільненні під дією магнітного поля, встановлення оптимального вмісту фібри та інших параметрів складу фібробетонної суміші. Поставлені задачі розв'язуються за допомогою експериментально-статистичних моделей, отриманих за допомогою математичного планування експериментів. За результатами досліджень розроблено методики проектування складів сталевібро- та базальтофібробетонів із комплексом заданих властивостей.

In the article the complex technological is established solutions aimed at obtaining high-quality fiber concrete is highlighted: choose the type of the fiber, its orientation during compaction under the influence of a magnetic field, an optimal fiber content and other parameters of fiber-reinforced concrete mixture composition. The problem is solved with the help of experimental-statistical models derived using mathematical planning of experiments. According to the research are received the complex of experimental and statistical models that allow to assess the impact of the type and amount of fiber on the fiber concrete strength characteristics, as well as to design the compositions of fiber concrete with the complex specified properties. Also in the article are analyzed

*Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення*

the effectiveness of the impact of mobility concrete mixes, on effect of metal fiber orientation in a magnetic field, and reducing the material and energy resources in the production of fiber concrete by using low clinker blast furnace cement and basalt fiber.

Ключові слова: фібра, магнітне поле, рухомість, портландцемент, шлакопортландцемент, фібробетон, суперпластифікатор.

Keywords: fiber, magnetic field, mobility, portland cement, blastfurnase cement, fiber concrete, superplasticizer.

Вступ. В сучасному будівництві все ширше застосовують фібробетон, для якого характерні підвищені значення міцності на розтяг, ударо- та вібростійкість, низька стираність та ряд інших покращених фізико-механічних властивостей.

На даний час запропонована велика кількість видів фібри, яка відрізняється властивостями матеріалу та геометричними параметрами. В Україні поширені сталеві фібри, виготовлені із низьковуглецевої сталі, а також базальтова фібра. В даній роботі виконано порівняльний аналіз трьох видів сталевих фібр: хвилеподібної Ф1 60/1, анкерної із загнутими та зплющеними кінцями (Ф2 60/1, Ф3 50/1), а також досліджено вплив технологічних параметрів на властивості сталевих фібробетонів. Для визначення можливості зниження витрат матеріальних та енергетичних ресурсів на виготовлення фібробетонів із заданими властивостями досліджено також ефективність застосування малоклінкерного шлакопортландцементу і базальтової фібри.

Аналіз останніх досліджень. Основні дослідження, що стосуються фібробетонів направлені на дослідження його властивостей і використання для виготовлення різного виду конструкцій. Проектування складів фібробетонів виконуються на базі існуючих емпіричних рекомендацій [1,2]. Разом з тим для технологічної практики представляє інтерес розробка розрахунково-експериментальних методів. Існуючі методи стосуються бетонів, які не містять дисперсної арматури, для їх проектування ключове значення має водоцементне відношення. Разом з тим, як відомо [3], на формування міцнісних властивостей фібробетонів, особливо міцності на розтяг при згині, визначальне значення має наявність фібри та її витрати. Прогнозування

властивостей фібробетону та кількісна оцінка впливу варійованих факторів можлива при застосуванні експериментально-статистичних моделей. Ряд таких моделей отримано різними дослідниками [3-5], проте вони, зазвичай, не направлені на проектування складу.

Метою роботи було побудова комплексу експериментально-статистичних моделей, які дозволяють оцінювати вплив виду та кількості фібри на міцнісні характеристики фібробетону, а також здійснювати проектування складів фібробетонів із комплексом заданих властивостей. Крім того в роботі аналізується ефективність впливу складу бетонної суміші на ефект орієнтування металеві фібри в магнітному полі, а також можливість зменшення матеріальних та енергетичних ресурсів на виробництво фібробетону за рахунок використання малоклінкерного шлакопортландцементу і базальтової фібри.

Методика досліджень. Дослідження, основні результати яких наведені в статті, виконані за допомогою математичного планування експерименту, яке дозволяє при раціональному об'ємі експериментальних робіт отримати адекватні рівняння регресії, що характеризують вплив досліджуваних факторів на вихідний параметр.

Для вибору виду фібри, що дозволяє отримати бетон з найбільш високими показниками міцності на розтяг при згині, були проведені експерименти із застосуванням двох напівреплік типу 2³⁻¹ [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	X ₁	Анкерна*	Хвилеподібна
Водоцементне відношення	X ₂	0,35	0,45
Вміст цементу, кг/м ³	X ₃	500	600

*- в першій напіврепліці була застосована анкерна фібра із загнутими кінцями, а в другій –зі зплющеними кінцями.

В якості вихідних компонентів бетонної суміші використовували цемент ПЦ-I М500 ВАТ «Волинь-цемент»,

**Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення**

кварцовий пісок із $M_{кр}=2,1$, гранітний щебінь фракції 5..20 мм. Витрата фібри складала 40 кг/м³. В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Співвідношення піску і щебеню розраховували згідно відомих рекомендацій [1].

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані поліноміальні моделі виду:

$$y=b_0+ b_1X_1+ b_2X_2+ b_3X_3+ b_{12}X_1X_2$$

Коефіцієнти математичних моделей приведені в табл.2

З аналізу отриманих моделей випливає, що найкращі показники міцності характерні при застосуванні хвилеподібної фібри, що можна пояснити її збільшеною поверхнею зчеплення із цементним каменем. Хвилеподібна фібра Ф1 60/1 прийнята для подальших досліджень сталевібробетону.

Таблиця 2

Коефіцієнти математичних моделей з порівнянням видів фібри

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	6,0/5, 78	-1,4/- 1,63	-0,3/- 0,3	0,2/0,1 8	0,2/0,18
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	77,3/ 74,8	-3,5/-6	-5,3/- 4,3	0,5/1,5	0,5/1,5

*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної та анкерної фібри із загнутими кінцями; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної та анкерної фібри із зплющеними кінцями.

Дослідженнями [7,8,9] встановлено позитивний вплив на фізико-механічні характеристики вібробетону орієнтування сталевібробетону перпендикулярно робочому навантаженню, яке досягається віброущільненням вібробетону при дії магнітного поля.

Момент сили, що необхідний для орієнтування фібри в бетонній суміші та потужність, яка поглинається сталевібробетонною сумішшю при вібруванні під дією магнітного поля залежать від граничного напруження зсуву і в'язкості бетонної суміші, що змінюються при зміні показника легкоукладальності [7].

Для визначення впливу рухомості бетонної суміші на ефективність орієнтування фібри були проведені досліді, результати яких наведені в табл.3. Необхідна рухомість бетонної

суміші забезпечувалась підбором вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. Вміст фібри у всіх складах бетонної суміші був постійним і складав 40 кг/м³. Орієнтування сталевих фібри відбувалося в результаті дії магнітного поля, яке створювалося електромагнітом, встановленим на лабораторному вібромайданчику.

Таблиця 3

Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики фібробетону

№	В/Ц	Вміст суперпластифікатора Melflux 2651F, % від маси цементу	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа
1	0,30	0,25	7	4,1	5,2
2	0,30	0,35	14	5,2	6,5
3	0,30	0,55	21	6,7	7,9
4	0,30*	0,54	21	3,9	5,3

*- контрольний склад, який ущільнений без дії магнітного поля.

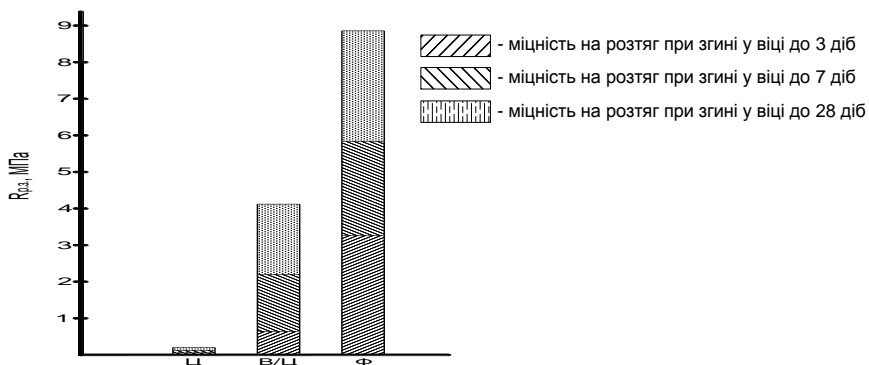


Рис. 1. Діаграма впливу витрат цементу, фібри та В/Ц на міцність фібробетону на розтяг при згині у віці 3,7 та 28 діб.

Ц – витрата цементу, кг/м³; Ф – витрата фібри, кг/м³; В/Ц – водоцементне відношення

Як слідує із даних табл.3 застосування бетонної суміші з ОК=7 см, ущільненої при дії магнітного поля, дало незначний ефект підвищення міцності бетону на розтяг при згині, що можна пояснити недостатньо вираженим ефектом орієнтування фібри в

**Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення**

малорухомих бетонних сумішах. Підвищення рухомості суміші з 7 до 21 см дало можливість при армуванні фіброю під дією магнітного поля суттєво покращити ефект орієнтування і збільшити міцність на розтяг при згині в 1,6 рази у віці 7 діб та в 1,5 рази у віці 28 діб.

Для визначення оптимальних параметрів складу фібробетонної суміші, що забезпечують необхідні задані міцнісні показники фібробетону, був реалізований тривірневий трифакторний близький до D – оптимального план [6].

Таблиця 4

Математичні моделі міцнісних параметрів фібробетону*

Вихідний параметр		Математичні моделі
Витрата суперпластифікатора, % маси цементу		$y^{**}=0,16-0,74X_1-0,86X_2+0,2X_3+0,88X_1^2+0,18X_2^2+0,18X_3^2+0,63 X_1X_2-0,1X_1X_3-0,18X_2X_3 \quad (1)$
Міцність на стиск, МПа	7 діб	$y=44,4-6,7X_1-7,3X_2-2,3X_3+8,618X_1^2+0,37X_2^2-0,682X_3^2-4,850X_1X_2-1,40X_1X_3+0,575X_2X_3 \quad (2)$
	28 діб	$y=60,6+0,72X_1-16,5X_2+4,8X_3+11,748X_1^2+2,2X_2^2+0,4X_3^2-6,70X_1X_2+1,80X_1X_3+2,70X_2X_3 \quad (3)$
Міцність на розтяг при згині, МПа	7 діб	$y=4,81-0,25 X_1-0,86X_2+0,37X_3+0,36X_1^2-0,11X_2^2-0,2X_3^2-0,450X_1X_2-0,075X_1X_3-0,225X_2X_3 \quad (4)$
	28 діб	$y=7-0,38X_1-1,01X_2-0,28 X_3+0,69X_1^2-0,26X_2^2-0,7X_3^2-0,45X_1X_2+0,05X_1X_3+0,18X_2X_3 \quad (5)$

$$* - X_1 = \frac{Ц - 500}{50}, X_2 = \frac{B/Ц - 0,4}{0,05}, X_3 = \frac{\Phi - 20}{40}.$$

** – витрата суперпластифікатора розрахована для отримання бетонної суміші з рухомістю 16 - 18 см

Аналіз моделей дає можливість кількісно оцінити вплив досліджених факторів на міцність фібробетону. З цього аналізу (рис. 1) випливає, що найбільший вплив на цей параметр чинить в дослідженому діапазоні вміст фібри та В/Ц, при чому визначальним параметром, що впливає на міцність на розтяг при згині є витрата фібри.

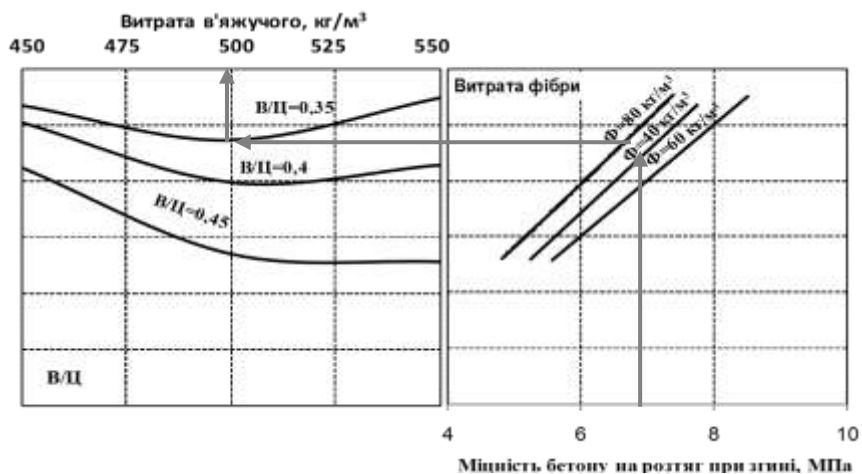


Рис. 2. Номограма міцності сталевібробетону на розтяг при згині у віці 28 днів

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі 5 (табл. 4) побудовано номограму міцності сталевібробетону. Дана номограма в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 4), може бути використана для проектування складів фібробетонів з комплексом заданих властивостей.

Залежно від конкретних умов визначальними параметрами складу сталевібробетону можуть бути або водоцементне відношення або витрати фібри. При проектуванні складів за табл. 5 визначаємо бажаний діапазон в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині. Приймавши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі наведеній на рис. 6 можна визначити основні параметри складу бетонної суміші, які будуть забезпечувати задану міцність бетону на розтяг при згині.

З рівняння 3 (табл. 4), уточнюється забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 днів.

За відомою методикою [1] розраховується склад бетонної суміші.

**Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення**

Таблиця 5 – Орієнтовні значення міцнісних характеристик
сталефібробетону у віці 28 діб

Витрата фібри, кг/м ³	В/Ц	$f_{c, tm}$, МПа	$f_{c, cube}$, МПа
20...40	0,35...0,4	6,02...7,51	65,8...72,2
	0,4...0,45	5,13...6,02	44,6...65,8
40...60	0,35...0,4	7...7,75	60,6...79,3
	0,4...0,45	5,3...7	46,3...60,6
60...80	0,35...0,4	7...7,75	65,8...83,9
	0,4...0,45	5,3...7	48,8...65,8

Приклад 1. Розрахувати склад високоміцного сталефібробетону з 28-добовою міцністю на стиск 75 МПа та міцністю на розтяг при згині 7 МПа. Насипна густина щебеню $\rho_{щ}=1,65$ г/см³, істинна густина щебеню $\rho_{щ}=2,85$ г/см³, істинна густина піску $\rho_{п}=2,65$ г/см³ [3].

1. За табл. 5 визначаємо діапазон В/Ц та витрати фібри, в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині. В даному випадку – це витрати сталльної фібри 40...60 кг/м³ та водоцементне відношення 0,35...0,4.

2. За номограмою, наведеною на рис. 2., задавшись з позицій економії мінімальною витратою фібри 40 кг/м³, визначаємо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги що до міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення ($\rho=500$ кг/м³, В/Ц=0,35, $\Phi=40$ кг/м³) в кодований вигляд:

$$X_1 = \frac{\rho - 500}{50} = \frac{500 - 500}{50} = 0;$$

$$X_2 = \frac{B/\rho - 0,4}{0,05} = \frac{0,35 - 0,4}{0,05} = -1; X_3 = \frac{\Phi - 20}{40} = \frac{60 - 20}{40} = -1$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння 3 (табл. 4) та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 75 МПа.

$f_{c,cube}=60,6+0,72\cdot 0-16,5\cdot (-1)+4,8\cdot (-1)+11,748\cdot (0)^2+2,2\cdot (-1)^2 +0,4\cdot (-1)^2-6,70\cdot 0\cdot (-1)+1,80\cdot 0\cdot (-1)+2,70\cdot (-1)\cdot (-1)=77,6$ МПа. Умова виконується: $77,6\geq 75$ МПа.

5. Розраховуємо, при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу, витрати води:

$$V=Ц\cdot B/Ц=500\cdot 0,35=175 \text{ л/м}^3$$

6. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу ($X_1=0$), фібри ($X_3=-1$) та водоцементного відношення ($X_2=-1$) в рівняння 1 (табл. 4), і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 16-18 см.

$СП=0,16-0,74\cdot 0-0,86\cdot (-1)+0,2\cdot (-1)+0,88\cdot 0+0,18\cdot (-1)^2+0,18\cdot (-1)^2+0,63\cdot 0\cdot (-1)-0,1\cdot 0\cdot (-1)-0,18\cdot (-1)\cdot (-1)=1\%$ від маси цементу.

7. При знайдених значеннях витрати цементу та води, за відомими методиками [1] визначаємо витрати заповнювачів, приймаючи коефіцієнт розсуву зерен $\alpha=1,5$ і пустотність щебеню $V_n^m=0,42$.

$$Щ = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{щ}^n}{\rho_{щ}} + \frac{1}{\rho_{щ}}} = \frac{1000}{1,5 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1370 \text{ кг/м}^3$$

$$П = (1000 - (\frac{Ц}{\rho_{ц}} + B + \frac{Щ}{\rho_{щ}})) \rho_n =$$

$$(1000 - (\frac{500}{3,1} + 175 + \frac{1370}{2,85})) \cdot 2,65 = 389 \text{ кг/м}^3$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 500 кг/м³, вода – 175 л/м³, щебінь – 1370 кг/м³, пісок – 389 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Melflux 2651f складає 1 % від маси цементу, витрата сталльної фібри 40 кг/м³. Розрахований склад фібробетону перевіряємо експериментально.

Метою роботи на другому етапі досліджень було встановлення можливості зниження матеріальних та енергетичних витрат на виробництво фібробетону шляхом використання

**Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення**

низькоенергоємних в'язучих, а саме малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ) та базальтової фібри.

В ДСТУ Б В.2.7-46: 2010 гармонізованому з європейським стандартом на цемент EN 197-1 поряд з двома відомими групами шлакопортландцементу ШПЦ III/A та ШПЦ III/B, з вмістом клінкеру відповідно 35-64 % та 20-34 %, передбачено шлакопортландцемент ШПЦ III/B, вміст клінкеру в якому складає 5-19 % [10].

Низький вміст клінкеру в МШПЦ обумовлює низькі значення рН бетонних сумішей (рН=9...10), тому бетони на такому цементі не забезпечують пасивацію сталі, що призводить до корозії і поступового руйнування сталльної фібри. Застосування такого цементу в бетонах дисперсно-армованих сталлюю фіброю не доцільно, разом з тим можливе застосування дисперсної арматури на основі неметалічних видів фібри – базальтових, скляних та поліпропіленових волокон. При цьому низький рівень рН бетонів буде позитивно впливати на довговічність виробів внаслідок зменшення корозійного впливу на неметалеву фібру.

В якості сировинних матеріалів, для проведення експериментальних досліджень було використано базальтові волокна довжиною 12 мм. В якості в'язучого використовувався малоклінкерний шлакопортландцемент наступного складу: клінкер - 12 %, доменний гранульований шлак - 88 %, фосфогіпс дигідрат - 7,5 % (в перерахунку на SO₃ - 4,5 %). Активність в'язучого з питомою з поверхнею 450 м²/кг складала 43 МПа. В якості пластифікуючої добавки було використано добавку суперпластифікатор СП-1 (С-3) підприємства "Поліпласт".

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі водопотреби бетонної суміші та міцності на стиск і розтяг при згині стандартних бетонних кубів на основі досліджуваних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 6.

Аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей дозволив визначити оптимальні рівні варійованих факторів при яких забезпечуються найкращі показники міцності бетону на стиск та розтяг при згині. Для фібробетону на базальтовому волокні вони складають: X₁=0,84 (Ц=484 кг/м³), X₂=0,91 (С-3=0,57 %), X₃=0,53 (Ф=0,77 кг/м³), X₄=-0,83 (ОК=1...2 см), при цьому забезпечується

міцність на стиск до 40 МПа та міцність на розтяг при згині до 7 МПа.

Збільшення вмісту базальтової фібри, як і у випадку із сталевібробетоном, є найбільш суттєвим фактором, що впливає на міцність бетону на розтяг при згині. Внаслідок дисперсного армування цементної матриці бетону волокнами базальтового волокна міцність бетону на розтяг при згині збільшується майже вдвічі у порівнянні з неармованими зразками.

Таблиця 6

Експериментально-статистичні моделі водопотреби та міцності фібробетону на малоклінкерному шлакопортландцементі *

Вихідний параметр	Математичні моделі
Водопотреба бетону, л/м ³	$V=187,4+1,2X_1-13X_2+0,84X_3+29,1X_4+8,8X_1^2-2,2X_2^2-9,2X_3^2-4,2X_4^2-0,4X_2X_4; (6)$
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	$R_{ст7} = 20+3,1X_1+5,1X_2+0,3X_3-5,4X_4-6,4X_1^2-6,3X_2^2-10,8X_3^2+19,7X_4^2+1,9X_1X_2-0,8X_1X_3-2,4X_1X_4-X_2X_3-2,2X_2X_4+0,8 X_2X_4 (7)$
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$R_{ст28} = 24,7+9,9X_1+4X_2+0,54X_3-2,6X_4-4,5X_1^2-1,6X_2^2-8,8X_3^2+16,8X_4^2+2,6X_1X_2+0,06X_1X_3-2,6X_1X_4+0,3X_2X_3-0,5X_2X_4-0,15X_3X_4 (8)$
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	$R_{p,з28} = 3,01+1,21X_1+0,5X_2+0,63X_3-0,66X_4-0,098X_1^2-0,011X_2^2-0,0262X_3^2-0,13X_4^2+0,34X_1X_2+0,41X_1X_3-0,292X_1X_4+0,32X_2X_3-0,068X_2X_4-0,134X_3X_4 (9)$

* $X_1 = \frac{C - 400}{100}; X_2 = \frac{СП - 0,3}{0,3}; X_3 = \frac{\Phi - 0,5}{0,5}; X_4 = \frac{OK - 6}{6}.$

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі 9 (табл. 6) побудовано номограму міцності фібробетону виготовленого на МШПЦ (рис. 3). Вона, в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 6), може бути використана також для проектування складів базальтофібробетонів з

Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології виготовлення

комплексом заданих властивостей при застосуванні малоклінкерного шлакопортландцементу і базальтової фібри.

Приклад 2. Розрахувати склад базальтофіробетону виготовленого на МШПЦ з 28-добовою міцністю на стиск 25 МПа та міцністю на розтяг при згині 5,5 МПа. Рухомість бетонної суміші за осадкою конуса 2...4 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор С-3. Насипна густина щебеню $\rho_{щ} = 1,65 \text{ г/см}^3$, істинна густина щебеню $\rho_{щ} = 2,85 \text{ г/см}^3$, істинна густина піску $\rho_{п} = 2,65 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 7 визначаємо діапазон рухомості та витрати базальтової фібри, в якому може знаходитись склад фіробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині. В даному випадку це витрата базальтової фібри 0,5...1 кг/м³ та рухомість 2...5 см.

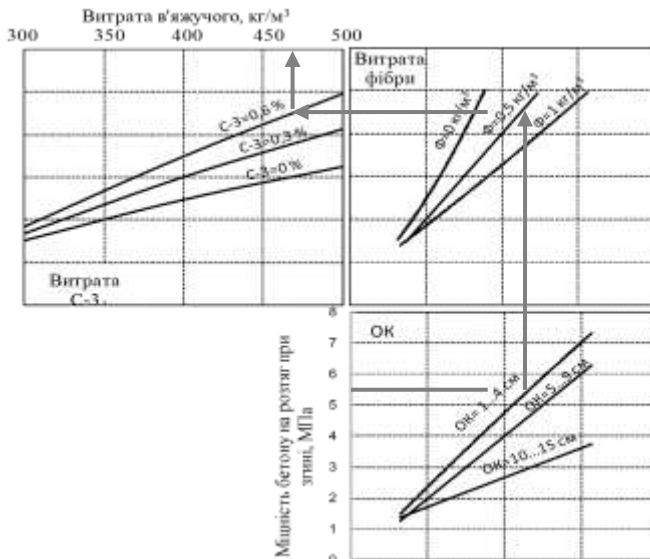


Рис. 3. Номограма міцності фіробетонів виготовлених на малоклінкерному шлакопортландцементі

2. За номограмою наведеною на рис. 3., задавшись з позицій економії мінімальною витратою фібри 0,5 кг/м³, визначаємо необхідні витрати в'язучого і пластифікуючої добавки, які б

забезпечували виконання поставленої вимоги що до міцності на розтяг при згині не менше 5,5 МПа.

3. Переводимо отримані значення ($\Pi=470 \text{ кг/м}^3$, $\Phi=0,5 \text{ кг/м}^3$, $C-3=0,6 \%$, $OK=2 \text{ см}$) в кодований вигляд:

$$X_1 = \frac{\Pi - 400}{100} = \frac{470 - 400}{100} = 0,7; \quad X_2 = \frac{C\Pi - 0,3}{0,3} = \frac{0,6 - 0,3}{0,3} = 1;$$

$$X_3 = \frac{\Phi - 0,5}{0,5} = \frac{0,5 - 0,5}{0,5} = 0; \quad X_4 = \frac{OK - 6}{6} = \frac{2 - 6}{6} = -0,67$$

4. Підставивши отримані результати в рівняння 8 (табл. 6), перевіряємо чи даний компонентний склад забезпечить необхідну міцність бетону на стиск у віці 28 діб ($f_{c, m} \geq 25 \text{ МПа}$).

$$f_{c, m} = 24,7 + 9,9 \cdot 0,7 + 4 \cdot 1 + 0,54 \cdot 0 - 2,6 \cdot (-0,67) - 4,5 \cdot 0,7^2 - 1,6 \cdot 1^2 - 8,8 \cdot 0^2 + 16,8 \cdot (-0,67)^2 + 2,6 \cdot 0,7 \cdot 1 + 0,06 \cdot 0,7 \cdot 0 - 2,6 \cdot 0,7 \cdot (-0,67) + 0,3 \cdot 1 \cdot 0 - 0,5 \cdot 1 \cdot (-0,67) - 0,15 \cdot 0 \cdot (-0,67) = 29,4 \text{ МПа}$$

$29,4 \geq 25$ – умова виконується.

Таблиця 7

Орієнтовні значення міцнісних характеристик базальтофібробетону у віці 28 діб

Витрата фібри, кг/м^3	Рухомість, см	$f_{c, m}$, МПа	$f_{c, cube}$, МПа
0...0,5	2...5	4,3...5,2	24,7...44,1
	6...10	2,5...3,8	22,1...24,7
0,5...1	2...5	5,8...7,3	16,4...36,0
	6...10	3,8...5,0	13,8...16,4

5. Підставляємо визначені по номограмі витрати матеріалів в рівняння 6 (табл. 6), і визначаємо витрату води яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші та задані міцнісні характеристики бетону.

$$V = 187,4 + 1,2 \cdot 0,7 - 13 \cdot 1 + 0,84 \cdot 0 + 29,1 \cdot (-0,67) + 8,8 \cdot 0,7^2 - 2,2 \cdot 1^2 - 9,2 \cdot 0^2 - 4,2 \cdot (-0,67)^2 - 0,4 \cdot 1 \cdot (-0,67) = 156 \text{ л/м}^3$$

6. При відомих значеннях витрати цементу та води, за відомими методиками [1] визначаємо витрати заповнювачів: $\Pi=1042 \text{ кг/м}^3$, $\Phi=866 \text{ кг/м}^3$.

**Ефективні будівельні матеріали, їх властивості та технології
виготовлення**

Витрата суперпластифікатора С-3 складає 0,6 % від маси цементу, витрата базальтової фібри 0,5 кг/м³.

Висновок. В результаті досліджень розроблено методики вибору оптимальних технологічних параметрів виробництва фібробетонів із застосуванням базальтової та сталльної фібри. Також запропоновані методики проектування складів сталевих та базальтофібробетонів із застосуванням експериментально-статистичних моделей.

1. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства: монографія/ Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – Київ: «Основа», 2007. – 616 с.
2. Пухаренко Ю. В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Пухаренко Ю. В. – Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2004, №10. –С. 47–50.
3. Рабинович Ф.Н. Применение сталефибробетона в конструкциях инженерных сооружений / Рабинович Ф.Н., Курбатов Л.Г. – Бетон и железобетон, 1984, № 12. – С. 22 – 25.
4. Волков И.В. Фибробетон – состояние и перспективы применения в строительных конструкциях /Волков И.В. – Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2004, № 5. – С. 5–7.
5. Антропова В.А. Свойства модифицированного сталефибробетона/ Антропова В.А., Дробышевский В.А. – Бетон и железобетон, 2002, № 3. – С. 3 – 5.
6. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експериментів: навч. посіб./ Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
7. Матус Є.П. Вплив магнітного поля на структуру і властивості цементно - піщаного сталефібробетону: автореферат дис. на здобуття наукового ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.05 /Є.П. Матус. Новомосковський архітектурно-будівельний університет. — Новосибірськ, 2000. – 20 с.
8. Патент Росії № 99113551/03(013855) від 21.06.1999 В28В 1/52.
9. Ключев С.В. Високоміцний фібробетон для промислового та цивільного будівництва / Ключев С.В. – Журнал цивільного будівництва, 2012, №8 – с.61-66.
10. Рунова Р.Ф. В'язучі речовини: підручник / Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. - К.: Основа, 2012.