

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ВЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ І БЕТОНИ ТА ЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

УДК 691.328

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

**DESIGN OF FIBER-REINFORCED CONCRETE COMPOSITIONS USING
EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELS**

**Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Дворкін Л.Й.,
д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Левчик О.О., (Національний
університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Bordiuzhenko O., candidate of technical sciences, associate professor,
ORCID: 0000-0003-3686-5121, Dvorkin L., doctor of technical sciences,
professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Levchyk O. (National University of
Water and Environmental Engineering, Rivne)**

**Наведено результати досліджень міцнісних властивостей
дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням
сталевою і базальтовою фіброю. Отримано комплекс експериментально-
статистичних моделей міцнісних властивостей та витрати
суперпластифікатора для такого виду бетону. Розроблено методику
проектування складу композиційного фібробетону, що включає
використання номограми та експериментально-статистичних моделей.**

**The article is devoted to the development of a methodology for designing the
composition of fine-grained fiber reinforced concrete with hybrid dispersed
reinforcement. Hybrid dispersed reinforcement includes the use of steel and
basalt fiber. As a result of the experiments which were carried out, a complex
of experimental and statistical models of strength properties and consumption
of superplasticizer for this type of concrete was obtained. A nomogram of the
properties of hybrid fiber reinforced concrete was constructed, which allows
determining the quantitative values of the concrete composition parameters. A
methodology for designing the composition of hybrid fiber reinforced concrete
is proposed, which includes the use of a nomogram and obtained
experimental-statistical models. The method allows consistently finding
consumption of both types of fiber, water-cement ratio and cement
consumption based on the required value of flexural tensile strength. Further,
on the basis of known dependencies, the rest of the mixture components are
determined. Using of an experimental-statistical model, the superplasticizer
content is established, which ensures the necessary concrete mix workability,**

is determined. An example of designing the composition of hybrid fiber reinforced concrete is given, in which the values of the content of all components are calculated step by step.

Ключові слова:

Композиційний фібробетон, сталева фібра, базальтова фібра, міцність бетону, номограма, проектування складу бетону, експериментально-статистичні моделі.

Hybrid fiber reinforced concrete, steel fiber, basalt fiber, concrete strength, nomogram, concrete composition design, experimental–statistical models.

Вступ. Аналіз досліджень. Формування структури та властивостей фібробетонних композицій визначається як компонентами бетонної матриці, так і дисперсним армуванням, геометричними параметрами фібри, її орієнтуванням, ступенем насичення бетону.

Проектування складу – один з найважливіших етапів технології бетону. Від того, наскільки правильно визначений склад бетону, залежать його властивості, довговічність і економічність.

У зв'язку із цим серйозна увагу приділяється розробці нових і вдосконаленню існуючих способів визначення складу бетону. Цьому питанню присвячені роботи багатьох дослідників [1-5]. Вони охоплюють майже всі існуючі модифікації бетонів (важкі, легкі, спеціального призначення тощо). Спосіб визначення складу конкретного виду бетону розробляється з урахуванням його специфічних особливостей. Що ж стосується фібробетонів, те для нього в літературі практично відсутні обґрунтовані правила, що дозволяють при визначенні співвідношення його компонентів враховувати специфічні особливості останніх і їх взаємодію при формуванні макроструктури, забезпечуючи при цьому одержання однорідних фібробетонних сумішей, високої якості, заданої рухомості, міцності і довговічності.

Формування макроструктури фібробетонної композиції, її щільність, визначається як компонентами бетонної матриці, так і фібровою арматурою, її геометричними параметрами, орієнтуванням, ступенем насичення. Тому призначення складу, власне, самого бетону без врахування параметрів армування, як це прийняте в більшості робіт [6-7], є однією з вагомих причин погіршення якості суміші при введенні до її складу дисперсної арматури і зниження ефективності фібрового армування.

У технології бетонів відомі десятки способів розрахунків складу бетону. Останнім часом розробляються методи більш точної оцінки впливу якості матеріалів і умов виготовлення на властивості бетонів.

З метою розробки методики проектування складів дрібнозернистого фібробетону були проведені дослідження, що дозволили отримати комплекс експериментально-статистичних моделей міцнісних властивостей та витрати

суперпластифікатора для дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням сталевую і базальтовою фіброю.

Матеріали та методи досліджень. Як сировинні матеріали використовували портландцемент ПЦ-І М500 заводу «Волинь-цемент», заповнювач із суміші фракцій 0,16...2 мм та 2...5 мм на основі кварцового піску та гранітного щебеню у співвідношенні 0,45:0,55. Рухомість бетонної суміші (ОК=13...15см) досягалася застосуванням полікарбосилатного суперпластифікатора Melflux 2651F. Використовували сталеву хвилясту фібру довжиною 60 мм і діаметром 1 мм та базальтову фібру довжиною 12 мм.

Умови планування експерименту наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

№	Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
1	Витрата цементу, кг/м ³ , (Ц)	x ₁	450	500	550	50
2	В/Ц	x ₂	0,3	0,5	0,4	0,05
3	Витрата сталеві фібри, кг/м ³ , (СФ)	x ₃	80	100	120	20
4	Витрата базальтової фібри, кг/м ³ , (БФ)	x ₄	0	2	4	2

Результати досліджень. В результаті реалізації експерименту за планом В₄ [3] отримані експериментально-статистичні моделі нормованих параметрів фібробетону та витрати суперпластифікатора (табл. 2).

Таблиця 2

Експериментально-статистичні моделі досліджених параметрів фібробетону

Вихідний параметр	Експериментально-статистичні моделі	
Міцність при стиску в 28 діб, МПа	$f_{cm}^{28} = 78,4 + 5x_1 - 14,2x_2 - 0,1x_3 + x_4 - 1,1x_1^2 - 0,6x_2^2 - 0,7x_3^2 - 1,3x_4^2 - 0,1x_1x_2 + 0,2x_1x_3 - 0,35x_2x_3$	(1)
Міцність на розтяг при згині в 28 діб, МПа	$f_{c,tf}^{28} = 17,85 + 0,66x_1 - 2,03x_2 + 2,32x_3 + x_4 + 0,88x_1^2 + 0,33x_2^2 - 1,62x_3^2 - 0,57x_4^2 - 0,75x_1x_2 - 0,18x_1x_3 - 0,1x_1x_4 - 0,19x_3x_4$	(2)
Витрата суперпластифікатора Melflux 2651 F	$СП = 0,41 + 0,09x_1 - 0,33x_2 + 0,12x_3 + 0,11x_4 - 0,06x_1^2 + 0,2x_2^2 - 0,03x_3^2 - 0,02x_4^2 - 0,07x_1x_2 - 0,02x_1x_3 + 0,04x_1x_4 - 0,05x_2x_3 + 0,04x_2x_4 + 0,04x_3x_4$	(3)

Розрахунок складу фібробетону номографічним методом. Для розрахунку складів бетонів різного виду часто використовуються номограми вихідних параметрів, побудованих на основі експериментально-статистичних моделей. Відповідно до В.А. Вознесенського [8] це типова задача управління, що полягає у визначенні комбінацій факторів, які забезпечують задані показники вихідного параметра. На рис. 1 наведена номограма для визначення витрати цементу при заданій міцності композиційного фібробетону на розтяг при згині. Дана номограма спільно із комплексом отриманих моделей (табл. 2), може бути використана для проектування складів композиційних фібробетонів з комплексом заданих властивостей.

Прийнявши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі на рис. 1, визначаємо основні параметри складу бетонної суміші, які забезпечуватимуть задану міцність бетону на розтяг при згині.

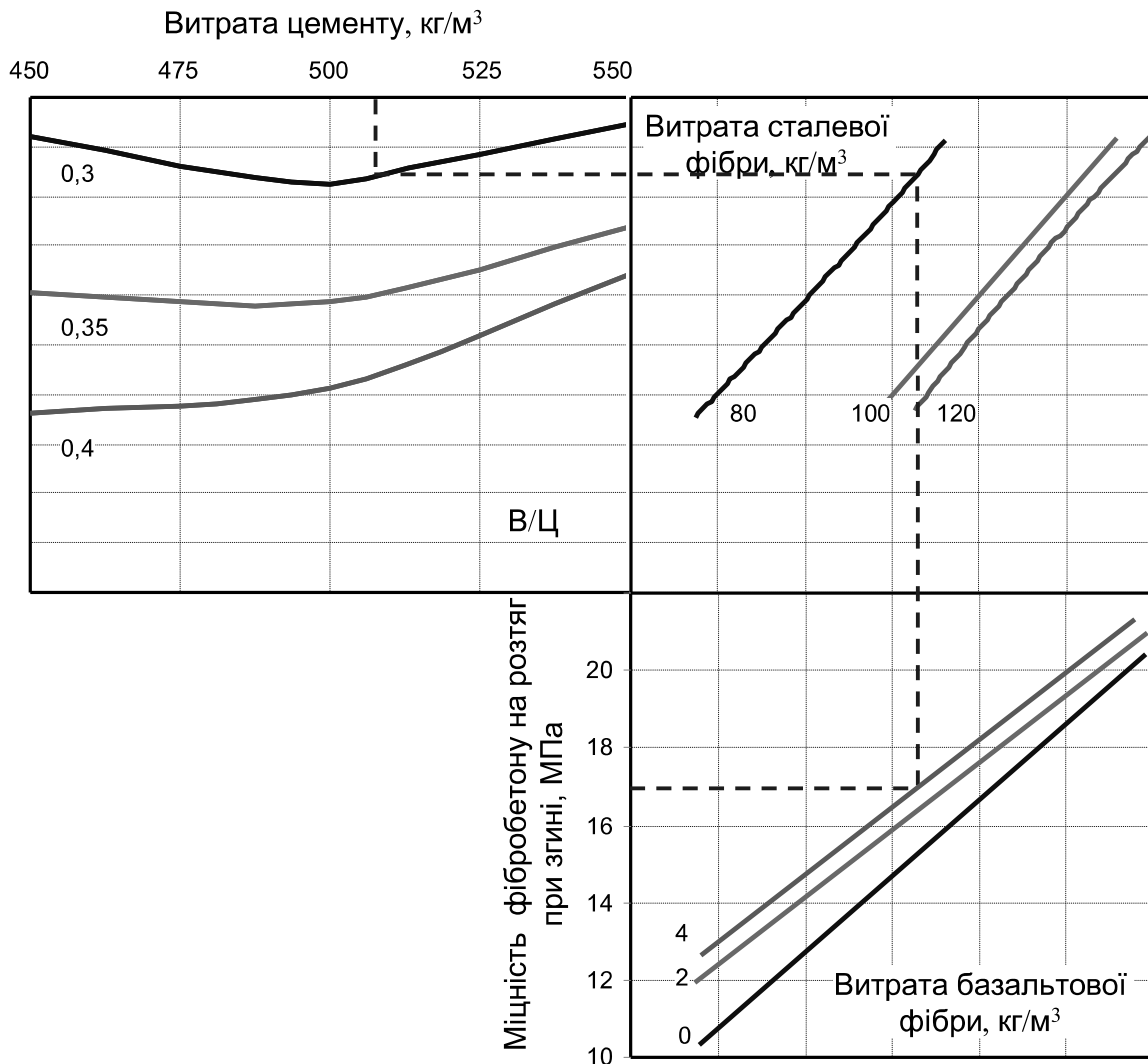


Рис. 1. Номограма міцності фібробетону з композиційним дисперсним армуванням на розтяг при згині у віці 28 діб

Переведення значень параметрів складу фібробетонної суміші в кодований вигляд проводиться за наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{Ц - 500}{50}; x_2 = \frac{В/Ц - 0,35}{0,05}; x_3 = \frac{СФ - 100}{20}; x_4 = \frac{БФ - 2}{2}, \quad (1)$$

де Ц, СФ, БФ – відповідно витрати цементу, сталеві фібри та базальтової фібри.

Підставивши отримані значення в рівняння 1 і 2 (табл. 2), перевіряємо забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 діб.

Розраховуємо при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу витрати води за формулою:

$$В = Ц \cdot В/Ц. \quad (2)$$

Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу, фібри та водоцементного відношення в рівняння 3 (табл. 2), і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 13...15 см. При необхідності забезпечення іншої рухомості бетонної суміші вміст суперпластифікатора уточнюється експериментально.

За відомою методикою [1] визначаємо витрати заповнювачів фракцій, що застосовуються (0,16...2 і 2...5 мм) враховуючи, що оптимальне їх співвідношення прийнято 45% і 55% відповідно.

Приклад. Розрахувати склад дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням з 28-добовою міцністю при стиску 70 МПа та міцністю на розтяг при згині 17 МПа. Істинна густина суміші заповнювача (пісок і щебінь гранітний фракції 2...5 мм) $\rho_3 = 2,7 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 3 визначаємо діапазон В/Ц та витрати фібри, в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск на розтяг при згині. В даному випадку цей діапазон максимально широкий – це витрати сталеві фібри 80...120 кг/м³, базальтової – 0...4 кг/м³ та водоцементне відношення 0,3...0,4.

2. За номограмою (рис. 6.1, синя лінія), задавшись з позицій економії мінімальною витратою сталеві фібри 80 кг/м³, визначаємо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги щодо міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення (Ц=507 кг/м³, В/Ц=0,3, СФ=80 кг/м³, БФ=4 кг/м³) в кодований вигляд:

$$X_1 = \frac{(Ц - 500)}{50} = \frac{(507 - 500)}{50} = 0,13; X_2 = \frac{(В/Ц - 0,35)}{0,05} = \frac{(0,3 - 0,35)}{0,05} = -1;$$

$$X_3 = \frac{(СФ - 100)}{20} = \frac{(80 - 100)}{20} = -1; X_4 = \frac{(БФ - 2)}{2} = \frac{(4 - 2)}{2} = 1.$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння (1) та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 75 МПа.

$$f_{cm} = 78,4 + 5 \cdot 0,13 - 14,2 \cdot (-1) - 0,1 \cdot (-1) + 1 \cdot 1 - 1,1 \cdot (0,13)^2 - 0,6 \cdot (-1)^2 - 0,7 \cdot (-1)^2 - 1,3 \cdot 1^2 - 0,1 \cdot 0,13 \cdot (-1) + 0,2 \cdot 0,13 \cdot (-1) - 0,35 \cdot (-1) \cdot (-1) = 91,4 \text{ МПа.}$$

Умова виконується $94,1 \geq 75 \text{ МПа}$.

Таблиця 3

Орієнтовні значення міцнісних характеристик композиційного фібробетону у віці 28 діб

Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Витрата сталеві фібри, кг/м ³	В/Ц	$f_{c,tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28} , МПа
0...2	80...100	0,3...0,35	14,2...17,8	70,3...95,3
		0,35...0,4	10,5...17,8	55,8...81,2
	100...120	0,3...0,35	16,7...20,95	68,9...94,4
		0,35...0,4	16,7...18,5	54,2...79,1
2...4	80...100	0,3...0,35	16,2...20,5	71,1...94,8
		0,35...0,4	12,1...17,17	55,9...82,0
	100...120	0,3...0,35	18,2...23,5	69,3...96,3
		0,35...0,4	17,8...18,8	55,8...79,7

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

$$В = Ц \cdot В/Ц = 507 \cdot 0,3 = 152 \text{ л/м}^3.$$

6. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу ($X_1=0,13$) водоцементного відношення ($X_2=-1$), сталеві фібри ($X_3=-1$) та базальтової ($X_4=1$) в рівняння з табл. 4.5 і визначаємо витрату суперпластифікатора (СП) полікарбоксилатного типу Melflux 2651f, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 13...15 см.

СП = 0,93% від маси цементу.

7. Визначаємо витрати заповнювачів:

Об'єм заповнювачів (V_3):

$$V_3 = 1000 - \left(\frac{507}{3,1} + \frac{152}{1} + \frac{80}{7,8} + \frac{4}{2,65} \right) = 672,7 \text{ л.}$$

Маса заповнювачів (m_3):

$$m_3 = V_3 \cdot \rho_3 = 672,7 \cdot 2,7 = 1816 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{3(0,16...2 \text{ мм})} = m_3 \cdot 0,45 = 1816 \cdot 0,45 = 817 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{3(2...5 \text{ мм})} = m_3 \cdot 0,55 = 1816 \cdot 0,55 = 999 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий розрахунковий склад: цемент – 507 кг/м³, вода – 152 л/м³, заповнювач фракції 2...5 мм – 999 кг/м³, 0,16...2 мм – 817 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Melflux 2651f становить 0,93% від маси цементу, витрата сталеві фібри 80 кг/м³, базальтової фібри – 4 кг/м³.

Розрахунковий склад фібробетону необхідно перевірити та відкоригувати експериментально.

Висновки

1. Отримано експериментально-статистичні моделі міцнісних параметрів фібро бетону з композиційним дисперсним армуванням а також необхідної витрати суперпластифікатора.

2. На основі отриманих моделей побудовано номограму міцності фібробетону, що дозволяє визначати окремі параметри його складу.

3. Запропоновано методику розрахунку складу композиційного фібробетону, що включає використання номограми та експериментально-статистичних моделей.

1. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2007. – 616 с.

L. Dvorkin, O. Dvorkin (2007) Basic concrete science. – К.: Osnova.

2. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.

Yu. Bazhenov (2002) Concrete technology - М.: Publishing house DIA.

3. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov Multi-Parametric Concrete Compositions Design.: New York Nova Science Publishers.

4. Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites (1998) / Ed. A.M. Brandt. – E&FN Spon.

5. A.Neville (2000) Wlasciwosci betonu. – Krakow.

6. D. Gilles, H. Ziad, S. Alain, C. Sandriue, W. Luc (2013) Precast thin UHPFRC curved shells in a waste water treatment plant, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, France, Marseille, 49–58.

7. A. E. Naaman (2003) Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites, Journal of advanced concrete technology, 1, 241–252.

8. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища шк., 1989. – 328 с.

V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko, B.L. Ogarkov (1989) Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer. – К.: Vishcha school.