



Дворкін Л.Й.



Степасюк Ю.О.

Дворкін Л. Й., доктор техн. наук, професор,  
Степасюк Ю. О., аспірант,

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

## БАЗАЛЬТОФІБРОБЕТОН НА МАЛОКЛІНКЕРНОМУ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ

В статті розглянуто результати досліджень фібробетону виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу із вмістом клінкеру менше 20 %. Визначено вплив базальтової фібри на міцнісні характеристики бетону. Запропоновано методика розрахунку складу базальтофібробетону з комплексом заданих властивостей.

В українському стандарті 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 % [1]. Вітчизняне виробництво не має досвіду виробництва таких цементів, хоча малоклінкерні цементы, наповнені промисловими відходами (шлак, зола-винесення), мають ряд позитивних особливостей. Вони характеризуються низькою вартістю, їх виробництво менш енергоємне, дозволяє утилізувати накопичені відходи, знизити шкідливі викиди в атмосферу. Однак такі цементы поки не надто популярні серед виробників головним чином через відносно низьку активність, повільного набору міцності і підвищеної водопотреби [2].

Низький вміст клінкеру в цементі обумовлює низькі значення рН бетонних і розчинових сумішей (рН = 9...10), тому бетони на такому цементі не забезпечують пасивацію арматурної сталі, що призводить до корозії і поступового руйнування арматури. Застосування такого цементу в конструктивних виробках вимагає вжиття заходів що до захисту сталі арматури від корозії (нанесення антикорозійних покриттів) або використання дисперсного армування неметалічною фіброю, що дозволяє суттєво збільшити міцність бетону на згин. При використанні шлакопортландцементу зі вмістом клінкеру 5...19% корозія базальтових та скляних волокон не відбувається і несуча здатність дисперсноармованих бетонних виробів не зменшується.

Метою даної роботи було вивчення комплексного впливу на міцність фібробетону, виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ), витрати цементу, фіброволокна та добавки суперпластифікатора, при різній рухомості бетонної суміші.

Таблиця 1.

Технічні характеристики фіброволокна

Характеристики	Базальтове волокно
Діаметр волокна, мкм	16
Довжина, мм	12
Міцність на розрив, Н/мм <sup>2</sup>	110
Модуль пружності, МПа	7000
Кількість одиничних волокон, млн. шт/кг	74,4
Температура плавлення, °С	1450

В якості сировинних матеріалів, для проведення експериментальних досліджень було використано базальтове волокно довжиною 12 мм, основні характеристики яких наведені в табл. 1. Кількість введеного волокна складала 0, 0,5 та 1 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші. В якості в'язучого використовувався малоклінкерний шлакопортландцемент наступного складу: клінкер – 12 %, доменний гранульований шлак – 88 %, фосфогіпс дигідрат – 7,5 % ( в перерахунку на SO<sub>3</sub> – 4,5 %). Хімічний склад матеріалів наведений в табл. 2. Активність в'язучого з питомою поверхнею 550 м<sup>2</sup>/кг складала 43 МПа. В якості пластифікуючої добавки було використано добавку суперпластифікатор СП-1 (С-3) підприємства «Поліпласт». В якості заповнювачів для бетону використовувались гранітний щебінь Клесівського родовища з максимальною крупністю зерен 20 мм та пісок Нетішинського кар'єру з Мкр = 1,9.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований трирівневий чотирифакторний план [3]. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.

Таблиця 2.

Хімічний склад вихідних матеріалів

Вид матеріалів	Вміст оксидів, мас. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Доменний гранульований шлак	39,52	6,49	0,12	47,13	3,10	1,74	1,15	-
Фосфогіпс	-	0,36	0,15	38,4	0,003	59,7	-	0,67
Клінкер	22,47	5,26	4,07	66,18	0,64	0,46	0,29	-

Таблиця 3.

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X <sub>1</sub>	Витрата в'язучого, кг/м <sup>3</sup> (Ц)	300	400	500	100
2	X <sub>2</sub>	Витрата пластифікатора, % (С-3)	0	0,3	0,6	0,3
3	X <sub>3</sub>	Витрата фібри, кг/м <sup>3</sup> (Ф)	0	0,5	1	0,5
4	X <sub>4</sub>	Рухомість суміші, см (ОК)	2	6	10	4

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. 4.

Таблиця 4.

Експериментально-статистичні моделі водопотреби та міцності фібробетону на малоклінкерному шлакопортландцементі

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

Примітка: в рівняннях (1-4):  $X_1 = \frac{(Ц-400)}{100}$   $X_2 = \frac{(C-3-0,3)}{0,3}$   $X_3 = \frac{(Ф-0,5)}{0,5}$   $X_4 = \frac{(ОК-6)}{6}$

Аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей, дозволив визначити оптимальні рівні варійованих факторів при яких забезпечуються найкращі показники міцності бетону на стиск та розтяг. Для базальтового волокна вони складають:  $X_1 = 0,84$  ( $Ц = 484$  кг/м<sup>3</sup>),  $X_2 = 0,91$  ( $C-3 = 0,57\%$ ),  $X_3 = 0,53$  ( $Ф = 0,77$  кг/м<sup>3</sup>),  $X_4 = -0,83$  ( $ОК = 1...2$  см), при цьому забезпечується міцність на стиск в межах 40 МПа та міцність на розтяг при згині в межах близько 7 МПа. Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водопотребу бетонної суміші та міцність бетону на стиск і розтяг представлені, на рис. 1, 2.

Аналізуючи отримані експериментально-статистичні моделі, приходимо до висновку, що найбільш суттєвим фактором, який впливає на водопотребу бетонної суміші є її ру-

хомість. Збільшення рухомості від 1...4 см до 10...15 см призводить до збільшення водопотреби в середньому на 30%. Вплив даного фактору носить практично лінійний характер і він складає близько 70% впливу всіх інших факторів. Дещо знівелювати даний вплив можна збільшенням витрати суперпластифікатора С-3, збільшення вмісту якого, до величини 0,6% від маси цементу дозволяє знизити кількість води, необхідну для отримання бетонної суміші із заданою рухомістю, на 15% і відповідно підвищити міцність. Збільшення кількості в'язучого, в варійованих межах, суттєво не впливає на водопотребу фібробетону. До деякого збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонної суміші, із заданим показником рухомості, призводить збільшення витрати фібри до величини 0,5 кг на м<sup>3</sup> бетонної суміші.

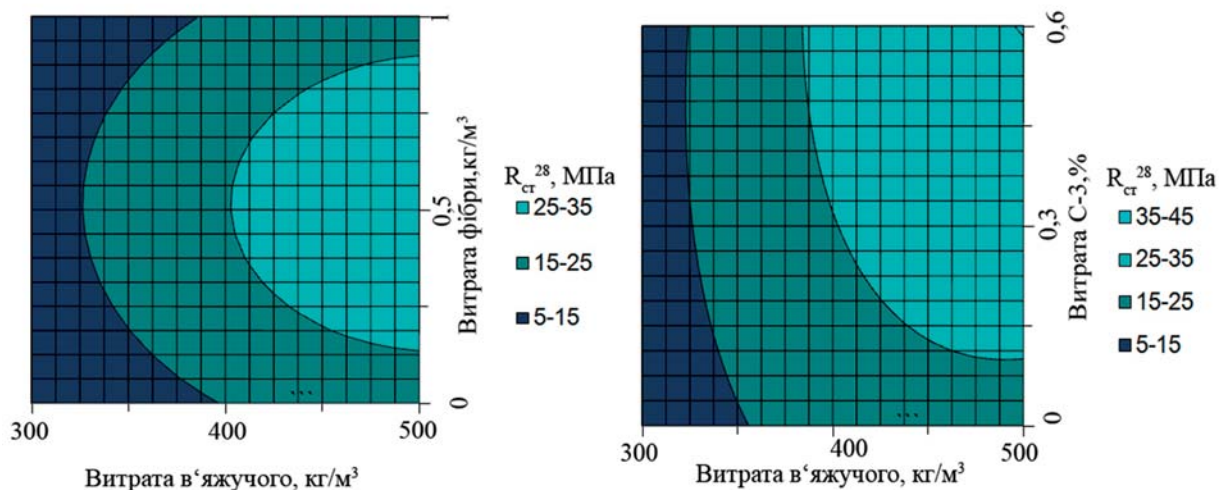


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на міцність фібробетону на стиск у віці 28 діб

Аналіз рівнянь регресії 2 та 3 та графічних залежностей зображених на рис. 1. дозволяє зробити висновок, що міцність фібробетону у віці 28 діб так як і міцність у віці 7 діб збільшується при збільшенні витрати в'язучого та добавки суперпластифікатора С-3, що пов'язано із зменшенням водоцементного відношення, необхідного для отримання бетонної суміші із заданою рухомістю. Також варто відмітити, що вплив даних факторів є найбільшим, і їхній вклад в марочну міцність бетону складає 60 та 30% відповідно. Тобто при збільшенні витрати в'язучого від 300 до 500 кг/м<sup>3</sup> та витрати суперпластифікатора від 0 до 0,6% від маси цементу міцність фібробетону зростає приблизно на 40%. Також позитивно на міцність впливає збіль-

шення вмісту фібри, але до величини не більше 0,5 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші.

Аналізуючи графічні залежності наведені на рис. 2 можна зробити висновок, що збільшення вмісту фібри є найбільш суттєвим фактором який впливає на міцність бетону на згин. Внаслідок трьохмірного дисперсного армування цементної матриці бетону волокнами базальтового волокна міцність бетону на розтяг при згині збільшується майже вдвічі.

Другий етап досліджень був присвячений встановленню впливу кількості базальтової фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого бетону. При цьому також здійснювалося порівняння впливу базальтового фіброволокна довжиною 12 та 24 мм. У ході досліджень в кожній

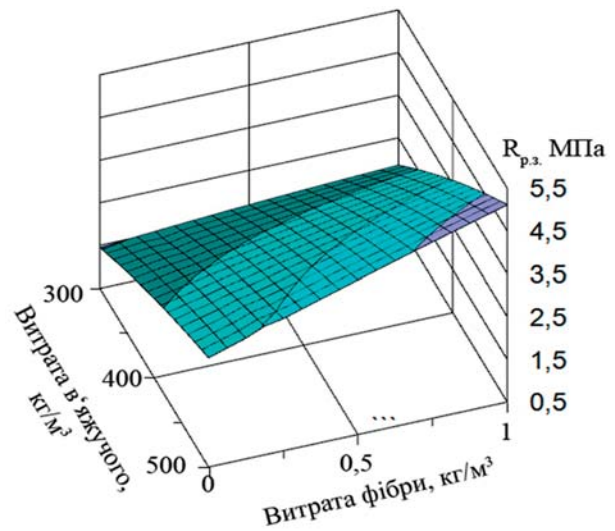
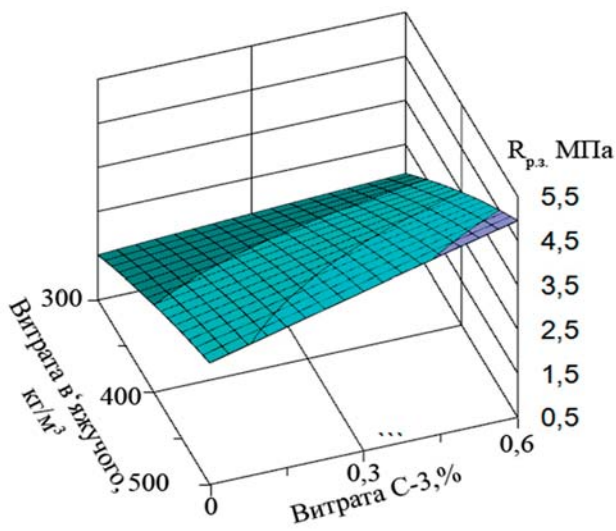


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на міцність фібробетону на розтяг при згині

Таблиця 5.

**Вплив базальтової фібри різної довжини на властивості дрібнозернистого бетону виготовленого**

№ п/п	Ц:П	Вит-рата фібри, кг/м³	Фібра довжиною 24 мм			Фібра довжиною 12 мм				
			В/Ц	R <sup>7</sup> <sub>зг</sub> МПа	R <sup>28</sup> <sub>ст</sub> МПа	R <sup>28</sup> <sub>зг</sub> МПа	В/Ц	R <sup>7</sup> <sub>зг</sub> МПа	R <sup>28</sup> <sub>ст</sub> МПа	R <sup>28</sup> <sub>зг</sub> МПа
1	1:3	0	0,34	1,82	22,6	4,9	0,34	1,82	22,6	4,9
2	1:3	1,0	0,39	1,9	23,4	7,1	0,35	6,4	26,2	7,6
3	1:3	5,0	0,39	2,65	19,6	6,8	0,39	5,3	22,6	5,8
4	1:3	10,0	0,42	2,56	18,5	6,5	0,39	5,6	14,7	5,6
5	1:3	15,0	0,44	3,35	17,6	5,8	0,4	4	16,5	5,3

точці плану виготовляли дрібнозернистий бетон складу в'язуче:пісок 1:3, визначали водо-цементне відношення (В/Ц) для досягнення розпливу конуса розчину на струшуючому столику в межах 112-115 мм, а також міцність зразків-балочок на стиск і згин у віці 7 і 28 діб.

Дослідженнями встановлено, що використання базальтової фібри в складі дрібнозернистого бетону, виготовленого на малоклінкерному ШПЦ, дозволяє збільшити його міцність при стиску на 14 %, а міцність на розтяг при згині на 35 %. Також слід відзначити, що збільшення довжин фібри суттєво не впливає на властивості фібробетону, а дещо гірші показники базальтової фібри довжиною 24 мм в порівнянні з фіброю 12 мм можна пояснити тим, що довші волокна гірше розподіляються в товщі бетону. Збільшення ж кількості фібри понад 1 кг/м³ негативно впливає на міцнісні характеристики фібробетону. Це пов'язано із збільшенням кількості води необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі (4) (табл. 3) побудовано номограму міцності фібробетону виготовленого на МШПЦ. Дана номограма дозволяє прогнозувати міцність бетонів при заданому компонентному складі або визначати витрату одного із компонентів при заданому вмісті інших. Вона, в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 3), може бути використана також для проектування складів фібробетонів з комплексом заданих властивостей. При цьому методика розрахунку полягає в наступному:

1. Використовуючи номограму наведену на рис. 3, визначаємо витрати вяжучого, суперпластифікатора С-3 і фіброволокна, які б забезпечували необхідні міцнісні показники бетону із заданою рухомістю.

2. Переводимо отримані значення витрат компонентів в кодований вигляд використовуючи формули 5-8:

$$X_1 = \frac{(Ц-400)}{100} \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{(С-3-0,3)}{0,3} \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{(Ф-0,5)}{0,5} \quad (7)$$

$$X_4 = \frac{(ОК-6)}{6} \quad (8)$$

3. Підставивши отримані значення в рівняння 3, перевіряємо чи даний компонентний склад забезпечить необхідну міцність бетону на стиск у віці 28 діб ( $R_{ст}^{28} \geq R_{ст}^{28}$  МПа).

4. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрат матеріалів в рівняння 1, і визначаємо витрату води яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші та задані міцнісні характеристики бетону.

5. Визначивши витрату цементу та витрату води, за відомими формулами 9,10 визначаємо витрати заповнювачів.

$$\omega = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{щ}}{\rho_{нц}} + \frac{1}{\rho_{ц}}} \quad (9)$$

де  $V_{щ}$  – пористість щебеню.

$$П = \left( 1000 - \left( \frac{\omega}{\rho_{ц}} + B + \frac{\omega}{\rho_{нц}} \right) \right) \quad (10)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт розсуву зерен,  $\rho_{нц}$  – насипна густина щебеню,  $\rho_{ц}$  – істинна густина щебеню,  $\rho_{п}$  – істинна густина піску. [2]

**Приклад розрахунку**

Розрахувати склад фібробетону бетону виготовленого на МШПЦ з 28-добовою міцністю на стиск 25 МПа та міцністю на розтяг при згині 6 МПа. Рухомість бетонної суміші рівна 5 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор С-3. Коефіцієнт розсуву зерен  $\alpha = 1,46$ , насипна густина щебеню  $\rho_{нц} = 1,65$  г/см³, істинна густина щебеню  $\rho_{щ} = 2,85$  г/см³, істинна густина піску  $\rho_{п} = 2,65$  г/см³. [4]

1. За номограмою наведеною на рис. 3. визначаємо витрати вяжучого, суперпластифікатора С-3 і фіброволокна, які забезпечували виконання поставлених вимог ( $R_{ст}^{28} = 30$  МПа,  $R_{p,z}^{28} = 6$  МПа, ОК = 7 см).

2. Переводимо отримані значення ( $\omega = 485$  кг/м³, С-3 = 0,6 %, Ф = 1 кг/м³, ОК = 5 см) в кодований вигляд використовуючи формули 5-8:

$$X_1 = \frac{(Ц-400)}{100} = \frac{(485-400)}{100} = 0,85 \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{(С-3-0,3)}{0,3} = \frac{(0,6-0,3)}{0,3} = 1 \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{(\Phi-0,5)}{0,5} = \frac{(1-0,5)}{0,5} = 1 \quad (7)$$

$$X_4 = \frac{(OK-6)}{6} = \frac{(5-5)}{5} = 0 \quad (8)$$

3. Підставивши отримані результати в рівняння 3, перевіряємо чи даний компонентний склад забезпечить необхідну міцність бетону на стиск у віці 28 діб ( $R_{смп}^{28} \geq 25$  МПа).

$$R_{смп}^{28} = 24,7 + 9,9 \cdot 0,85 + 4 \cdot 1 + 0,54 \cdot 1 - 2,6 \cdot 0 - 4,5 \cdot 0,85^2 - 1,6 \cdot 1^2 - 8,8 \cdot 1^2 + 16,8 \cdot 0^2 + 2,6 \cdot 0,85 \cdot 1 + 0,06 \cdot 0,85 \cdot 1 - 2,6 \cdot 0,85 \cdot 0 + 0,3 \cdot 1 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1 \cdot 0 - 0,15 \cdot 1 \cdot 0 = 26,6 \text{ МПа}$$

26,6  $\geq$  25 – умова виконується.

4. Підставляємо визначені по номограмі витрати матеріалів в рівняння 1, попередньо перевіривши їх в кодовані значення використовуючи формули 5-8, визначаємо вит-

рату води яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші та задані міцнісні характеристики бетону.

$$B = 187,4 + 1,2 \cdot 0,85 - 13 \cdot 1 + 0,84 \cdot 1 + 29,1 \cdot 0 + 8,8 \cdot 0,85^2 - 2,2 \cdot 1^2 - 9,2 \cdot 1^2 - 4,2 \cdot 0^2 - 0,4 \cdot 1 \cdot 0 = 171 \text{ л/м}^3$$

5. Визначивши витрату цементу та витрату води, за відомими формулами 9,10 визначаємо витрати заповнювачів.

$$Ц = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{в}}{\rho_{н.ц}} + \frac{1}{\rho_{ц}}} = \frac{1000}{1,46 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1380 \text{ кг/м}^3 \quad (9)$$

$$П = \left( 1000 - \left( \frac{Ц}{\rho_{ц}} + B + \frac{Ц}{\rho_{ц}} \right) \right) \cdot \rho_n =$$

$$= \left( 1000 - \left( \frac{485}{3,1} + 171 + \frac{1380}{2,85} \right) \right) \cdot 2,65 = 497 \text{ кг/м}^3 \quad (10)$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 485 кг/м<sup>3</sup>, вода – 171 л/м<sup>3</sup>, щебінь – 1380 кг/м<sup>3</sup>, пісок – 497 кг/м<sup>3</sup>.

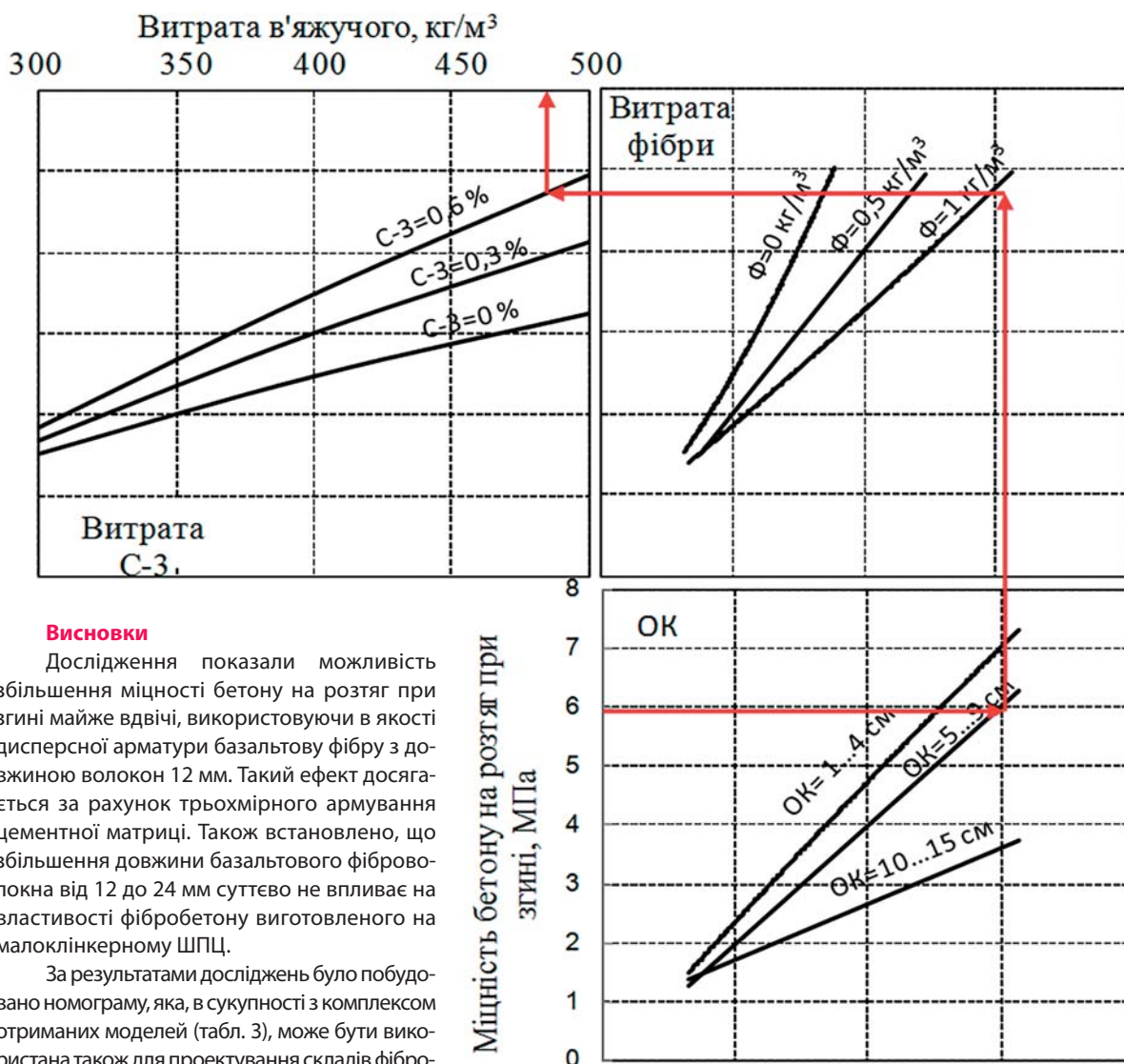


Рис. 3. Номограма міцності фібробетонів виготовлених на малоклінкерному шлакопортландцементі

#### Література:

1. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: Підручник. – К.: Основа, 2012.
2. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О., Мохорт М.А., Безсмертний М.П. Використання технологічних продуктів у будівництві. – Рівне: НУВГП, 2009.
3. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту /Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. – Рівне: НУВГП, 2011.
4. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства – К.: Основа, 2007.1