

Дворкін Л. Й., д.т.н., професор, Марчук В. В., к.т.н., доцент
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПОРИЗОВАНІ СУХІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

У статті показано можливість отримання поризованих та теплоізоляційних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів. Наведено результати експериментальних досліджень розчинів та сухих будівельних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів. Показано можливість отримання таких розчинів. Наведено і проаналізовано експериментально-статистичні моделі технологічних та фізико-механічних властивостей розчинових сумішей та розчинів, показано шляхи їх покращення.

Ключові слова: портландцемент; реакційно-порошковий бетон; будівельний розчин; міцність; суперпластифікатор.

Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більше актуальними в будівництві завдяки перевагам у порівнянні з товарними розчиновими сумішами [1; 2]. В деяких випадках стає неефективною експлуатація великих заводів з виробництва товарних розчинових сумішей внаслідок підвищення транспортних витрат. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

Реакційно-порошкову бетону суміш (РПБ) до замішування водою можна розглядати як сухі суміші, що містять в'язуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола та інші) і суперпластифікатор, а також добавки-модифікатори (мікрокремнезем, метакаолін та інші) [3]. Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність бетонів та

розчинів у різних умовах експлуатації [4; 5]. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати необхідних властивостей сухих сумішей, розчинів та бетонів різного призначення [6]. Високі механічні характеристики РПБ можна пояснити підвищенням однорідності РПБ шляхом усунення крупних заповнювачів, а також підвищенням щільності бетону шляхом оптимізації зернового складу суміші. На основі проведених досліджень [5–7], як один з базових може бути рекомендований склад РПБ (ПЦ-I – 35%, зола-винесення – 15%, кварцовий пісок фр. 0,15...0,63 – 50%, полікарбоксилатний суперпластифікатор 0,5% від маси цементу). Міцність РПБ при стиску у віці 1 доба становила 38,8 МПа, у віці 7 діб – 87,0 МПа, у віці 28 діб – 112,1 МПа.

Для підвищення термічного опору конструкцій при зведенні будівель та споруд доцільно використовувати поризовані розчини. Поризовані розчини на основі сухих сумішей при відповідності їх властивостей необхідним вимогам можуть успішно використовуватись для влаштування «теплих підлог», як штукатурні, а також мурувальні розчини при застосуванні стінових матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями (поризовані керамічні блоки, піно-, газобетонні блоки і т.п.). Ефект від застосування таких матеріалів зростає, якщо теплопровідність розчину для кладки не поступається аналогічному показнику стінового матеріалу. Як відомо, традиційні цементно-піщані розчини мають високу теплопровідність (0,8–0,9 Вт/м·К), що особливо негативно відображається в кладці з поризованих блоків (0,16 Вт/м·К), які вони скріплюють, в результаті чого в такій конструкції в місцях шва утворюються «містки холоду». При застосуванні таких розчинів збільшення товщини швів до 10 мм призводить до зниження середнього термічного опору конструкції приблизно на 20%.

Зазвичай традиційна технологія передбачає нанесення розчинів шаром 10–20 мм. Сучасні стінові камені та блоки виготовляються з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, що дає можливість використовувати шов 1–5 мм, що сприяє суттєвій економії розчину. Розчини для тонкошарової кладки повинні мати теплопровідність, яка близька до теплопровідності пористих стінових матеріалів. Поряд зі зменшенням теплових витрат такі розчини повинні забезпечувати високу адгезію до основи, водо- та морозостійкість.

3 метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики полегшених розчинів на основі РПБ, а також встановлення оптимальних параметрів їх виготовлення основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експериментів. Для цього був реалізований трирівневий трифакторний план B_3 [8], умови планування експериментів наведено в табл. 1.

Як добавка-поризатор розчинів був застосований піноутворювач UFAPORE CC85 концерн *Mareil*. Даний поризатор є сумішшю аніоноактивних ПАР. Рекомендоване дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02–0,05% маси в'язучого. Окрім пластифікації та підвищення морозостійкості розчину, добавка поризатора дещо знижує водовідділення і розшарування розчинних сумішей [3].

Для підвищення ефективності введення суперпластифікаторів, а також при виконанні робіт у холодну пору року, при температурах нижче 5° С доцільне введення прискорювача тверднення Na_2SO_4 .

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Відношення РПБ до заповнювача, (РПБ/Зап.)	X_1	1:3	1:2	1:1	-
Вміст добавки Ufaroge у розчині, %	X_2	0,04	0,075	0,11	0,035
Вміст Na_2SO_4 , у розчині, % від РПБ	X_3	0	1	2	1

У ході досліджень виготовляли розчини на основі РПБ, у яких в якості заповнювача використовували золу-виносу та кварцовий пісок. Рухомість розчинів становила 180 мм за розпливом на віскозиметрі Суттарда. Для розчинової суміші визначали водов'язуче відношення, яке забезпечує необхідну рухомість, для отриманих розчинів – середню густину (ρ_0) та міцність на стиск (f_m) зразків-кубів з ребром 70,7 мм, які тверднули у повітряно-сухих умовах у віці 3 та 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Основні експериментальні результати досліджень поризованих розчинів на основі РПБ наведено в табл. 2.

Після проведення обробки і статистичного аналізу

експериментальних даних були отримані математичні моделі властивостей у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведено в табл. 3, і відповідні графічні залежності середньої густини та міцності у віці 3 та 28 діб – на рис. 1–3.

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що поризація розчинів і відповідно вміст добавки-поризатора помітно збільшує їх рухомість згідно з табл. 2 та рис. 1. Водопотреба розчинових сумішей для досягнення необхідної легкоукладальності суттєво зменшується при збільшенні кількості добавки-пороутворювача, але до певної межі, яка залежить від середньої густини отриманої розчинової суміші та співвідношення «в'яжуче:заповнювач».

Таблиця 2

Експериментальні результати досліджень поризованих розчинів

№	Фактори			В/Ц		Середня густина, ρ_0 , кг/м ³		Міцність у віці діб, МПа,			
	РПБ Зап	Ufapore, %	Na ₂ SO ₄ , %	Зола	Пісок	Зола	Пісок	Зола		Пісок	
								3	28	3	28
1	1:1	0,11	2	0,4	0,34	1180	1320	8,9	15,4	10,2	17,7
2	1:1	0,11	0	0,38	0,32	1170	1310	8,1	14,0	9,2	16,0
3	1:1	0,04	2	0,51	0,43	1340	1490	12,7	21,9	14,7	25,4
4	1:1	0,04	0	0,5	0,43	1320	1470	11,7	20,1	13,6	23,3
5	1:3	0,11	2	0,55	0,47	1360	1550	6,1	10,5	7,0	12,1
6	1:3	0,11	0	0,53	0,45	1350	1540	5,7	9,8	6,5	11,2
7	1:3	0,04	2	0,66	0,56	1400	1590	7,8	13,4	9,0	15,5
8	1:3	0,04	0	0,64	0,54	1390	1580	7,0	12,0	7,9	13,6
9	1:1	0,075	1	0,45	0,38	1210	1370	10,0	17,2	11,4	19,6
10	1:3	0,04	1	0,65	0,55	1390	1580	7,4	12,7	8,6	14,7
11	1:2	0,11	1	0,45	0,38	1200	1380	8,4	14,5	9,5	16,4
12	1:2	0,04	1	0,53	0,45	1290	1470	11,7	20,2	13,6	23,4
13	1:2	0,075	2	0,5	0,43	1250	1440	10,9	18,8	12,3	21,2
14	1:2	0,075	0	0,48	0,41	1240	1430	9,9	17,1	11,4	19,7
15	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1250	1450	10,3	17,8	11,7	20,3
16	1:2	0,075	1	0,5	0,43	1250	1440	10,3	17,7	11,6	20,0
17	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1240	1440	10,2	17,5	11,7	20,1

При однаковому вмісті пороутворювача зменшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» від 1:1 до 1:2 незначно зменшує водопотребу розчинової суміші, у якій заповнювачем є зола-виносу.

При цьому водов'язуче відношення дещо збільшується. Подальше зменшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» до 1:3 помітно зменшує водопотребу та водоцементне відношення. Заміна золи як заповнювача на кварцовий пісок суттєво зменшує водопотребу та збільшує рухомість розчинової суміші.

Таблиця 3

Експериментально-статистичні моделі властивостей розчинів на основі РПБ

Заповнювач	Експериментально-статистичні моделі	
зола	$\rho_{0(z)} = 1246 - 67 \cdot x_1 - 48 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 28,8 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 59 \cdot x_1^2 + 4 \cdot x_2^2 + 4 \cdot x_3^2$	(1)
пісок	$\rho_{0(n)} = 1440 - 88 \cdot x_1 - 50 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 31,3 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 43,5 \cdot x_1^2 - 6,5 \cdot x_2^2 + 3,5 \cdot x_3^2$	(2)
зола	$f_m^3 = 10,3 + 1,75 \cdot x_1 - 1,36 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_3 - 0,54 \cdot x_1 x_2 + 0,08 \cdot x_1 x_3 - 0,08 \cdot x_2 x_3 - 1,64 \cdot x_1^2 - 0,25 \cdot x_2^2 + 0,09 \cdot x_3^2$	(3)
пісок	$f_m^3 = 11,76 + 2,01 \cdot x_1 - 1,64 \cdot x_2 + 0,46 \cdot x_3 - 0,69 \cdot x_1 x_2 + 0,06 \cdot x_1 x_3 - 0,09 \cdot x_2 x_3 - 1,79 \cdot x_1^2 - 0,24 \cdot x_2^2 + 0,06 \cdot x_3^2$	(4)
зола	$f_m^{28} = 17,77 + 3,02 \cdot x_1 - 2,34 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_3 - 0,94 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 - 0,14 \cdot x_2 x_3 - 2,83 \cdot x_1^2 - 0,43 \cdot x_2^2 + 0,16 \cdot x_3^2$	(5)
пісок	$f_m^{28} = 20,26 + 3,49 \cdot x_1 - 2,78 \cdot x_2 + 0,81 \cdot x_3 - 1,15 \cdot x_1 x_2 + 0,13 \cdot x_1 x_3 - 0,18 \cdot x_2 x_3 - 3,15 \cdot x_1^2 - 0,4 \cdot x_2^2 + 0,15 \cdot x_3^2$	(6)

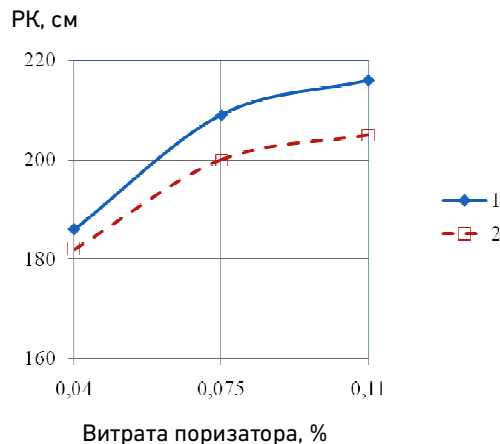


Рис. 1. Залежність розпливу конуса(ПК) поризованих розчинів від витрати поризатора та виду заповнювача (1 – заповнювач – зола-виносу; 2 – заповнювач – кварцовий пісок)

Згідно отриманих математичних моделей (табл. 3) та графічних залежностей на їх основі (рис. 2) можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на середню густину, є вміст та доля заповнювача, а також вміст добавки поризатора у розчині. Прискорювач твердіння, введений до складу суміші, практично не впливає на густину.

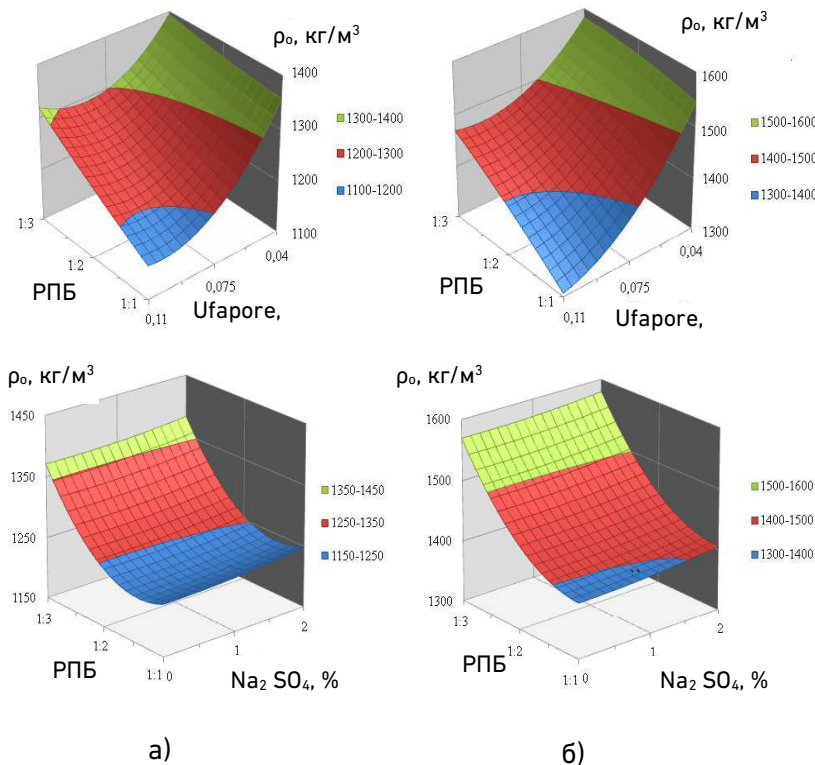


Рис. 2. Поверхні відгуку середньої густини поризованих розчинів на основі РПБ, заповнювач: а – зола-виносу; б – кварцовий пісок

Збільшення вмісту пороутворювача зменшує густину розчину, втім після певної межі (приблизно 0,1% від маси сухої суміші) ефект стає нестабільним. Подальше зменшення густини при використанні прийнятого поризатора практично незначне. З цією метою можна використовувати добавки з більш інтенсивним піноутворенням, хоча при цьому можна очікувати негативного їх впливу на кінетику твердіння та міцність розчинів.

Аналізуючи міцність поризованих розчинів (рис. 3), можна

зауважити, що як і слід було очікувати, вона залежить насамперед не від водов'язучого відношення, а від пористості розчину, яку можна оцінити за середньою густиною. Із збільшенням середньої густини міцність розчину зростає незалежно від складу розчину та виду заповнювача.

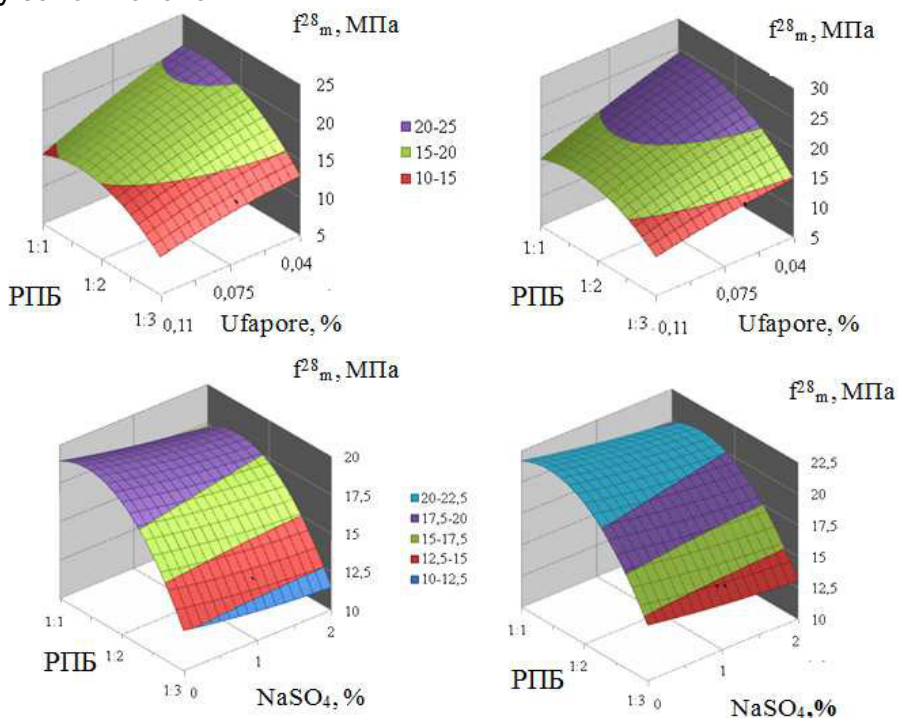


Рис. 3. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 28 діб на основі РПБ, заповнювач: а) зола-виносу; б) пісок

Для суміші на основі РПБ та золи-виносу характерна середня густина розчинів 1200–1400 кг/м³ та міцність 13–20 МПа. При цьому збільшення густини з 1200 до 1300 кг/м³ супроводжується ростом міцності на 20–25%, при співвідношенні суміші «РПБ:Зап»=1:1, подальше збільшення середньої густини не призводить до суттєвого підвищення міцності. Така ж залежність спостерігається за умови використання в якості заповнювача суміші кварцового піску, в цьому випадку отримують розчини міцністю 15–24 МПа. В свою чергу для цементно-піщаних сумішей середня густина збільшується до 1310–1600 кг/м³. Поризовані розчини складу РПБ:Зап=1:2 при збільшенні густини від 1210 до 1450 кг/м³ характеризуються лінійним збільшенням міцності на 60–70%, максимальним значенням 20 МПа

та 24 МПа для золи-виносу та піску – відповідно. При збільшенні вмісту заповнювача (РПБ:Зап=1:3) маємо зменшення міцності при рівній густині на обох заповнювачів. Прискорювач твердіння збільшує ранню міцність на 10–15% та марочної до 10%.

Проектування складу сухої поризованої суміші на основі РПБ.

За допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, зокрема його додатка «Пошук рішення», на основі отриманих експериментально-статистичних моделей (1)–(6) можна знаходити оптимальні склади поризованих розчинів, що забезпечують їх задані значення середньої густини та міцності при мінімальній вартості суміші. Для того щоб, розрахувати оптимальний для досліджених сумішей склад, необхідно розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: знайти такий склад суміші, який би дозволяв забезпечити параметри в межах допустимих значень факторів.

Постановку задачі знаходження оптимального складу сухої поризованої суміші на основі РПБ із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу суміші $x_1... x_n$, що дозволяють мінімізувати її вартість:

$$V_c = V_{РПБ} \cdot РПБ + V_{зап} \cdot (РПБ/n) + V_{п} \cdot П + V_{д} \cdot Д \rightarrow \min \quad (7)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості

$$\begin{aligned} P_1 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_2 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_m &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (8)$$

при $x_1... x_n \in [a...b]$,

де $V_{РПБ}$, $V_{зап}$, $V_{п}$, $V_{д}$ – відповідно вартість РПБ, заповнювача (піску або золи), добавки поризатора та добавки прискорювача твердіння у.о./кг;

$РПБ$, $П$, $Д$ – відповідно витрата РПБ, кварцового піску або золи, добавки поризатора та прискорювача твердіння, кг/м³;

n – співвідношення $РПБ/Зап$;

$P_1...P_m$ – задані показники якості суміші;

$x_1... x_n$ – фактори складу;

a , b – обмеження на можливі значення факторів.

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

$$x_1 = \frac{РПБ / Зап - 0,5}{0,5}; \quad x_2 = \frac{П - 0,075}{0,035}; \quad x_3 = \frac{ПТ - 1}{1}. \quad (9)$$

Послідовність розрахунку складу суміші наступна.

Підставляємо у моделі (1)–(6) задані значення показників нормованих властивостей, що повинні забезпечуватись, а у вираз (7) – значення вартості компонентів суміші для 3D будівельного принтеру. У виразі (8) встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі комп'ютерна програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи задані значення нормованих параметрів за виразами (1)–(6) мінімізуючи при цьому функцію (7). Для встановлення вартості суміші під час ітерацій визначаються оптимальні значення факторів складу: відношення РПБ/Зап, витрата РПБ, вміст та вид заповнювача, а також необхідна кількість добавок поризатора та прискорювача твердіння.

В таблиці 4 наведені розрахункові склади сумішей, що забезпечують при стандартній рухомості нормовані значення густини та міцності розчинів за умови мінімальної вартості. При вартості основних компонентів суміші, грн/кг: $V_{РПБ} = 2,1$; $V_{Зап, піску} = 0,6$; $V_{Зап, золи} = 0,9$; $V_{ПТ} = 26$; $V_{П} = 86$.

Таблиця 4

Типові склади поризованих сухих будівельних сумішей на основі РПБ

№ з/п	Марка розчину	Середня густина, кг/м ³	Вид заповнювача	Витрата, кг, на 1 т СБС			
				РПБ	Заповнювач	Поризатор UFAPORE	Прискорювач твердіння
1	M250	1500	пісок	350	650	0,4	7,0
2	M200	1500	пісок	335	665	0,5	2,8
3		1300	зола	315	685	0,4	3,1
4	M150	1350	пісок	280	710	0,9	1,6
5		1250	зола	260	740	1,1	1,5
6	M100	1200	зола	230	770	1,0	-

Висновок. Виконані дослідження показали, що пропонувані РПБ доцільно використовувати як напівфабрикат для сухих будівельних сумішей і поризованих розчинів на їх основі. У випадку використання в якості заповнювача золи-виносу міцність розчинів досягається 15–20 МПа при середній густині 1200–1400 кг/м³ та кварцового піску 20–25 МПа при середній густині – 1350–1550 кг/м³. Для досягнення вказаної середньої густини вміст у сухій суміші пороутворювача UFAPORE CC 85 повинен становити 0,04–0,11%.

1. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. К. : Видавництво КНУБіА, 2007. 256 с. 2. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / П. В. Захарченко, Е. М. Долгий, Ю. О. Галаган та ін. Київ, 2005. 512 с. 3. Калашников В. И. Перспективы использования реакционно-порошковых сухих бетонных смесей в строительстве. *Строительные материалы*. 2009. № 7. С. 59–61. 4. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М., 1998. 768 с. 5. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі / Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М., Житковський В. В., Кочкар'єв Д. В., Марчук В. В. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с. 6. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Марчук Б. В. Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей різного призначення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. Рівне : Видавництво «Волинські обереги», 2019. Вип. 37. С. 18–26. 7. Бетони нового покоління / Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Марчук В. В., Рубцова Ю. В. Рівне : НУВГП, 2021. 300 с. 8. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. Mathematical experiments planning in concrete technology. Nova Science Publishers, 2011.

REFERENCES:

1. Runova R. F., Nosovskyi Yu. L. Tekhnolohiia modyfikovanykh budivelnykh rozchyniv. K. : Vydavnytstvo KNUBiA, 2007. 256 s. 2. Suchasni kompozytsiini budivelno-ozdobliuvalni materialy / P. V. Zakharchenko, E. M. Dolhyi, Yu. O. Halahan ta in. Kyiv, 2005. 512 s. 3. Kalashnikov V. I. Perspektiviyi ispolzovaniya reaktsionno-poroshkovyih suhikh betonnyih smesey v stroitelstve. *Stroitelnyie materialyi*. 2009. № 7. S. 59–61. 4. Batrakov V. G. Modifitsirovannyye betonyi. Teoriya i praktika. M., 1998. 768 s. 5. Reaktsiino-poroshkovi betony i materialy na yikh osnovi / Dvorkin L. Y., Bordiuzhenko O. M., Zhytkovskyi V. V., Kochkarov D. V., Marchuk V. V. Rivne : NUVHP, 2020. 304 s. 6. Dvorkin L. Y., Marchuk V. V., Marchuk B. V. Reaktsiino-poroshkovi betony yak napivfabrykat dlia vyhotovlennia sukhykh budivelnykh sumishei riznoho pryznachennia. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy* : zb. nauk. prats. Rivne : Vydavnytstvo «Volynski oberehy», 2019. Vyp. 37. S. 18–26. 7. Betony novoho pokolinnia / Dvorkin L. Y., Zhytkovskyi V. V., Bordiuzhenko O. M., Marchuk V. V. Rubtsova Yu. V. Rivne : NUVHP, 2021. 300 s. 8. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. Mathematical experiments planning in concrete technology. Nova Science Publishers, 2011.

**Dvorkin L. Y., Doctor of Engineering, Professor, Marchuk V. V.,
Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate professor** (National
University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

POROUS CONSTRUCTION MIXES ON THE BASIS OF REACTION-POWDER CONCRETE

This paper presents the results of experimental studies of mortars based on dry mixes using reaction-powder concrete. For reaction-powder concrete (RPC), the typical compressive strength is in the range from 100 to 200 MPa, which can be several times higher than the strength of conventional concrete. RPC, along with high strength, also has a high crack resistance, which is characterized by the ratio of compressive strength to flexural strength. Powdered concrete can serve not only as the main structural material in the construction of buildings and structures, but also as a semi-finished product for obtaining dry building mixes for various purposes. The RPC does not contain a large filler instead, fine powders are used, such as quartz sand, ground quartz with particle sizes from 0.045 to 0.6 mm, microsilica, fly ash, ground slag and others. The term "reaction-powder" reflects the fact that all dispersed components in the RPC during curing undergo chemical transformations. Fly-ash can be used as additional component for the preparation of mixtures for various purposes. Dry construction mixes (DCM) are becoming increasingly important in construction due to a number of advantages over commercial mortar mixes. In some cases, the operation of large plants for the production of commercial mortar mixtures becomes inefficient due to increased transport costs. The use of DCM helps to increase productivity and quality of work, reduce transportation and storage costs, reduce technological operations. The ability to control the basic properties of DCM by changing the content of various components creates a wide range of materials needed for the construction of structures and thus allows you to use them in all types of work. For development of compositions of dry mixes it is expedient to use the statistical models received by means of mathematical planning of experiments. Based on the obtained data, experimental and statistical models of physical and mechanical properties of fresh

and hardened mortar has been built and analyzed. The article shows a solution to the optimization problem according to the criterion of the minimum cost of the composition mixture using computer software.

***Keywords:* portland cement; reactive-powder concrete; mortar; strength superplasticizer.**
