

МЕХАНОАКТИВАЦІЯ ЗМІШАНОГО В'ЯЖУЧОГО І ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ

INFLUENCE OF MECHANICAL ACTIVATION OF PORTLAND CEMENT WITH GROUND QUARTZ SAND ADDITIVE ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Барабаш І.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-0241-4728; Стрельцов К.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-5463-7395; Кірсанов М.В., аспирант, ORCID: 0009-0009-2377-159X, (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Barabash I. V, DSc, Professor, ORCID: 0000-0003-0241-4728; Streltsov K. A., Ph.D., Associate Professor, ORCID: 0000-0002-5463-7395; Kirsanov M. N, graduate student ORCID: 0009-0009-2377-159X, (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

При виробництві бетонних та залізобетонних виробів значне розповсюдження одержали портландцементи з використанням мінеральних добавок і, зокрема, меленого кварцового піску. Використувані змішані цементи можливо одержувати за двома технологіями: першої - сумісним помелом портландцементного клінкеру, двоводного гіпсу та кварцового піску; другої – в наслідок змішування портландцементу з меленим кварцовим піском. Найбільш ефективним методом покращення механічних характеристик як цементного каменю так і бетону на його основі є інтенсивна механохімічна активація змішаних в'яжучих в турбулентних швидкісних змішувачах примусової дії. Наведені у статті експериментальні результати пов'язані з визначенням впливу механохімічної активації портландцементу з добавкою меленого кварцевого піску в присутності суперпластифікуючої добавки SP-5 на міцність бетону на стиск у віці 3-х, 7-и та 28-и діб твердиння в н.у. Змішаний портландцемент отримували внаслідок швидкісного змішування висококонцентрованої суспензії портландцементу ПЦ I-500 з меленим кварцевим піском. Кількість меленого кварцевого піску варіювалося в діапазоні від 30 до 60 % маси змішаного в'яжучого.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням Д-оптимального математичного плану з варіюванням наступних факторів: X_1 - витрата змішаного в'яжучого (370 ± 50) кг/м³;

X_2 - витрата меленого кварцевого піску (45 ± 15) % від маси змішаного в'яжучого;

X_3 - витрата суперпластифікуючої добавки SP-5 – $(0,5 \pm 0,5)$ % маси змішаного в'яжучого.

Отримані математичні моделі наглядно свідчать про максимальний вплив на міцність бетону в 3-х, 7-и та 28-и добовому віці факторів X_2 та X_3 . Зростання витрати меленого кварцового піску у складі змішаного в'яжучого від 30 до 60 % викликає зменшення міцності бетону, тоді як підвищення витрати SP-5 від 0 до 1 % забезпечує практично такий же процент підвищення міцності бетону. Сумісне використання механоактивації портландцементу з меленим кварцовим піском та суперпластифікатору SP-5 сприяє підвищенню міцності бетону (в порівнянні з контролем – механоактивація відсутня) в середньому на 25...30 %.

In contemporary practice of manufacturing concrete and reinforced concrete products and structures, cements containing mineral additives, in particular ground quartz sand, have gained wide application. Such cements are produced either by simultaneous grinding of Portland cement clinker, gypsum dihydrate, and quartz sand, or by thorough mixing of Portland cement with ground quartz sand. A promising approach to improving the physico-mechanical properties of concrete based on such blended cements is the application of intensive mechanical activation in a high-speed turbulent mixer.

This study presents experimental results concerning the influence of mechanical activation of blended Portland cement in the presence of the superplasticizer SP-5 on the compressive strength of concrete at the ages of 3, 7, and 28 days. The blended Portland cement was obtained by combining Portland cement CEM I 52.5 (PC-I 500) with ground quartz sand in proportions ranging from 30 % to 60 % by mass of the blended binder.

The experimental program was designed using a D-optimal mathematical approach, with variation of the following factors:

- X_1 – content of blended cement (370 ± 50 kg/m³);
- X_2 – proportion of ground quartz sand (45 ± 15 % of the blended binder mass);
- X_3 – dosage of the superplasticizer SP-5 ($0,5 \pm 0,5$ % of the blended binder mass).

The developed mathematical models demonstrate that the most significant factors influencing the compressive strength of concrete at different curing ages are the proportion of ground quartz sand (X_2) and the dosage of superplasticizer (X_3). An increase in the proportion of ground quartz sand in the binder from 30 % to 60 % results in a reduction in compressive strength, whereas increasing the dosage of SP-5 from 0 % to 1 % leads to a comparable percentage increase in compressive strength. The combined application of mechanical activation of the blended binder and the superplasticizer SP-5

provides an improvement in compressive strength, compared to the control specimens, by an average of 25–30 %.

Ключові слова: змішаний портландцемент; механоактивація; портландцемент; суперпластифікатор; мелений кварцовий пісок; міцність на стиск.

mechanical activation; Portland cement; superplasticizer; ground quartz sand; compressive strength.

Вступ. Як показує досвід, однією з важливих проблем в технології виготовлення бетонних сумішей є створення оптимальних комбінацій портландцементу з мінеральними добавками, наявність яких забезпечує підвищення потенційних можливостей як змішаних в'яжучих так і бетонів на їх основі. Найбільше розповсюдження в якості мінеральних добавок до цементу одержали мелені вапняки, золи-виносу, доменні шлаки та кварцові піски. Наявність їх у складі в'яжучого надає йому ряд позитивних властивостей, а саме, знижену усадку, знижений екзотермічний розігрів та ін. Слід відмітити, що зростання цін на мінеральні в'яжучі надає особливе значення дослідженням, які направлені на вирішення питань, пов'язаних із зниженням матеріало- і енергоємності виробництва бетонних і залізобетонних виробів. Мінімізація енергетичних та матеріальних витрат в процесі їх виробництва досягається також за рахунок інтенсифікації процесів структуроутворення цементновміщуючих композицій. В цьому разі перспективним методом інтенсифікації процесів структуроутворення є механохімічна обробка портландцементу в швидкісному змішувачі турбулентного типу. В роботі розглядаються питання, які пов'язані з розглядом впливу механохімічної активації портландцементу з добавкою меленого кварцевого піску та суперпластифікатору SP-5 на міцність на стиск важкого бетону в 3-х, 7-и та 28-и добовому віці. Сумісне використання перерахованих рецептурно-технологічних факторів, як показують експериментальні результати, сприяє отриманню ресурсозберігаючих бетонів з покращеною міцністю на стиск.

Аналіз останніх досліджень. Застосування тонкодисперсного, з високою питомою поверхнею кварцевого піску, в якості мінеральної добавки до цементу є одним із найбільш ефективних рецептурно-технологічних прийомів, який застосовується в технології виготовлення як будівельних розчинів так і бетонів [1-4]. Відомо, що тонкомелені зерна кварцевого піску в цементному каміні сприяють зниженню об'ємних деформацій і підвищенню його корозійної стійкості [5, 6]. Спільне подрібнення портландцементу з кварцовим піском утворює змішаний цемент, який при твердинні характеризується зменшеними усадковими деформаціями в порівнянні з бездобавочними цементами [7, 8]. В умовах традиційної технології приготування бетонної суміші мелений кварцевий пісок практично не вступає в хімічну взаємодію з

новоутвореннями гідратуючого цементу і виконує тільки роль затравки, провокуючим, тим самим, прискорення процесів структуроутворення [9]. Ефективне підвищення активності в'яжучого досягається за рахунок використання швидкісних змішувачів турбулентного типу [10-12]. Основна ідея таких швидкісних змішувачів полягає в значному зростанні поверхневої енергії тонкодисперсних часток в'яжучого та мінеральних добавок до нього, що приводить до появи пластичної деформації, які змінюються появою тріщин з утворенням нових поверхонь. Внаслідок цього можливо розглядати використання швидкісних змішувачів як одним із способів підвищення активності змішаного в'яжучого, що в кінцевому випадку, приводить до підвищення міцності бетону та зниженню його собівартості.

Постановка мети і задач дослідження. В результаті літературного огляду наукових робіт попередників визначилася мета роботи, яка полягає в розробці технології виготовлення бетонних сумішей на змішаному портландцементу та одержанню бетону на його основі з підвищеною міцністю на стиск за рахунок механохімічної активації змішаного в'яжучого та використання суперпластифікатору SP-5.

В експериментальних дослідженнях в якості мінерального в'яжучого використовувався портландцемент ПЦ I-500 ПАТ «Волинь Цемент», який відповідає вимогам ДСТУ 2.7-46:2010 «Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови» та однорідна суміш портландцементу з добавкою меленого кварцового піску в ній.

Механохімічна активація водної композиції портландцементу з добавкою меленого кварцового піску в кількості $(45\pm15)\%$ від маси змішаного в'яжучого здійснювалася в швидкісному активаторі ($n=1800$ об/хв) протягом 120 сек. Активація суміші здійснювалася в присутності суперпластифікатору SP-5, витрата якого варіювалася в діапазоні від 0 до 1 % маси змішаного в'яжучого. В якості дрібного заповнювача для приготування бетонної суміші використовувався кварцовий пісок з $M_k=2,7$. В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь фракцій 5...10 та 10...20 мм в співвідношенні 40:60 %. Для сумісного визначення впливу досліджувемых факторів на міцність на стиск бетону був проведений 3-х факторний експеримент, де в якості незалежних факторів були прийняті: а) витрата змішаного портландцементу у складі бетонної суміші; б) витрата меленого кварцового піску у складі змішаного в'яжучого; в) витрата суперпластифікуючої добавки SP-5. Досліджувалася міцність бетонних зразків у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці твердиння в н. у. як на механоактивованому змішаному в'яжучому так і на в'яжучому, яке не підлягало механоактивації (контроль).

Результати досліджень. Для визначення сумісного впливу механоактивації, а також складу бетонної суміші на міцність бетону у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці був проведений 3-х факторний експеримент, де в якості незалежних перемінних були використані слідуючі фактори: X_1 - витрата

змішаного цементу (370 ± 50) кг/м³; X_2 - витрата меленого кварцовогопіску (45 ± 15) % від маси змішаного в'яжучого; X_3 - витрата суперпластифікуючої добавки SP-5 – ($0,5\pm0,5$) % маси змішаного в'яжучого. Витрата води замішування для кожної строчки математичного плану приймалася з розрахунку одержання рухливості бетонної суміші в діапазоні 7...8 см осідання конусу. Задана рухливість суміші приймалася однаковою для всіх строчок математичного плану та для двох порівнювальних технологій. План експерименту і склади досліджуваних бетонних сумішей для двох порівнювальних технологій наведено в табл.1.

Таблиця 1

Математичний план експерименту і склади бетонних сумішей з розрахунку на 7 л (для двох порівнювальних технологій виготовлення бетонних сумішей)

№	Рівні незалежних факторів			Портланд-цемент, г	Мелений кв. пісок, г	Кварцевий пісок, г	Гранітний щебінь фракцій		Супер-пластифікатор, г	Вода, г (контроль)	Вода, г (механоактивація)
	X_1	X_2	X_3				5...10 мм	10-20 мм			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	-	-	1568	672	5110	3510	5265	0	1523	1344
2	-	+	-	896	1344	5110	3510	5265	0	1501	1322
3	0	0	-	1424,5	1165,5	4984	3404	5106	0	1373	1217
4	+	-	-	2058	882	4865	3330	4995	0	1294	1176
5	+	+	-	1176	1764	4865	3330	4995	0	1499	1352
6	-	0	0	1232	1008	5110	3512	5268	11,2	1456	1277
7	0	-	0	1813	777	4984	3418	5127	12,9	1191	1062
8	0	0	0	1424,5	1165,5	4984	3418	5127	12,9	1243	1088
9	0	+	0	1036	1554	4980	3330	4995	12,9	1399	1243

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	+	0	0	1617	1323	4860	3512	5268	14,7	1352	1205
11	-	-	+	1568	672	5110	3512	5268	22,4	1299	1142
12	-	+	+	896	1344	5105	3514	5271	22,4	1299	1142
13	0	0	+	1424,5	1165,5	4980	3414	5121	25,9	1217	1062
14	+	-	+	2058	882	4867	3334	5001	29,4	1176	1058
15	+	+	+	1176	1764	4867	3334	5001	29,4	1205	1088

Показники міцності бетону на стиск у досліджуваному інтервалі часу на механоактивованому змішаному в'яжучому ($f_{\text{ск.cube}}^{\text{M.}}$) та в'яжучому, яке не піддавалося механоактивації ($f_{\text{ск.cube}}^{\text{K.}}$), наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Показники міцності бетону на стиск у досліджуваному інтервалі часу

№	Рівні незалежних факторів			Відгуки					
				$f_{\text{ск.cube}}^{\text{K.}}$, МПа			$f_{\text{ск.cube}}^{\text{M.}}$, МПа		
	X ₁	X ₂	X ₃	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	-	-	8,2	12,2	16,0	12,0	16,8	21,0
2	-	+	-	5,7	8,3	10,9	8,6	11,3	14,3
3	0	0	-	9,3	13,4	17,4	13,8	17,9	22,5
4	+	-	-	10,6	15,6	20,6	15,3	20,0	24,9
5	+	+	-	7,7	11,3	14,8	11,4	15,2	19,5
6	-	0	0	8,4	11,8	15,2	11,9	15,3	18,9
7	0	-	0	11,4	16,2	21,4	16,1	21,5	26,5
8	0	0	0	9,9	13,9	18,0	14,0	18,4	22,7

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	0	+	0	8,5	11,9	15,5	12,0	15,7	19,2
10	+	0	0	11,1	15,9	20,6	15,7	20,7	25,5
11	-	-	+	11,6	16,5	21,2	16,2	21,9	27,2
12	-	+	+	9,1	13,3	16,9	12,9	17,0	21,7
13	0	0	+	11,9	17,6	22,7	16,7	22,8	28,5
14	+	-	+	14,3	20,9	26,9	19,7	27,3	33,7
15	+	+	+	10,4	14,9	19,3	14,5	19,5	23,9

Примітка: $f_{\text{сж.cube}}^{\text{k}}$ - міцність на стиск бетону у 3-х, 7-и та 28-и добову віці на змішаному в'яжучому, яке не піддавалося механоактивації, МПа; $f_{\text{сж.cube}}^{\text{M}}$ - міцність на стиск бетону у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці на механоактивованому змішаному в'яжучому, МПа.

Математичні моделі, які відображають вплив технології приготування бетонної суміші та варійованих факторів складу на міцність на стиск бетону у досліджувані терміни часу, мають вигляд:

$$f_{\text{сж.cube}}^{\text{k.3}}(\text{МПа}) = 10,2 + 1,1X_1 - 0,5X_1^2 - 0,2X_1X_2 - 1,5X_2 - 0,3X_2^2 + 1,6X_3 + 0,3X_3^2 \quad (1)$$

$$f_{\text{сж.cube}}^{\text{k.7}}(\text{МПа}) = 14,4 + 1,7X_1 - 0,7X_1^2 - 0,4X_1X_2 - 2,2X_2 - 0,5X_2^2 + 2,2X_3 + 0,9X_3^2 \quad (2)$$

$$f_{\text{сж.cube}}^{\text{k.28}}(\text{МПа}) = 18,7 + 2,2X_1 - 1,0X_1^2 - 0,5X_1X_2 - 2,9X_2 - 0,5X_2^2 + 2,7X_3 + 1,1X_3^2 \quad (3)$$

$$f_{\text{сж.cube}}^{\text{M.3}}(\text{МПа}) = 14,5 + 1,5X_1 - 0,8X_1^2 - 0,3X_1X_2 - 2,0X_2 - 0,5X_2^2 + 1,9X_3 + 0,7X_3^2 \quad (4)$$

$$f_{\text{сж.cube}}^{\text{M.7}}(\text{МПа}) = 18,9 + 2,0X_1 - 1,1X_1^2 - 0,3X_1X_2 - 0,3X_2X_3 - 1,5X_2 - 0,3X_2^2 + 1,6X_3 + 0,3X_3^2 \quad (5)$$

$$f_{ck.cube}^{M.28} (\text{МПа}) = 23,4 + 2,4X_1 - 1,3X_1^2 - 0,4X_1X_2 - 0,4X_2X_3 - 3,5X_2 - 0,7X_2^2 + 3,3X_3 + 2,0X_3^2 \quad (6)$$

Розгляд математичних моделей (1...6) свідчить про те, що вибрані фактори варіювання по різному впливають на міцність бетону. Так, згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах як на механоактивованому змішаному в'яжучому так і на змішаному в'яжучому, яке не піддавалося механоактивації, визначальний вплив на міцність бетону на стиск у 28-и добовому віці надає фактор X_2 – вміст меленого кварцового піску у змішаному в'яжучому. Зростання його кількості від 30 до 60 % у складі змішаного в'яжучого приводить до зниження міцності бетону в середньому на 35 %, рис. 1.

Такий характер впливу вмісту меленого кварцевого піску на міцність бетону як на механоактивованому так і на змішаному в'яжучому, яке не підлягало механоактивації, спостерігається для всього діапазону витрати суперпластифікуючої добавки SP-5 (від 0 до 1 %). В той же час слід відмітити, що керуючи вмістом SP-5, а саме зростанням його кількості від 0 до 1 %, можливо компенсувати зниження міцності бетону (на 75...80 %) від введення до складу меленого кварцевого піску (30...60 %). Що стосується впливу витрати змішаного портландцементу (в перерахунку на 1 м³ бетону) на міцність бетону в 28-и добовому віці, то слід відмітити той факт, що зростання його кількості від 320 до 420 кг/м³ викликає підвищення його міцності в середньому на 23...26 % - це характерно для всіх вивчених концентрацій суперпластифікатору.

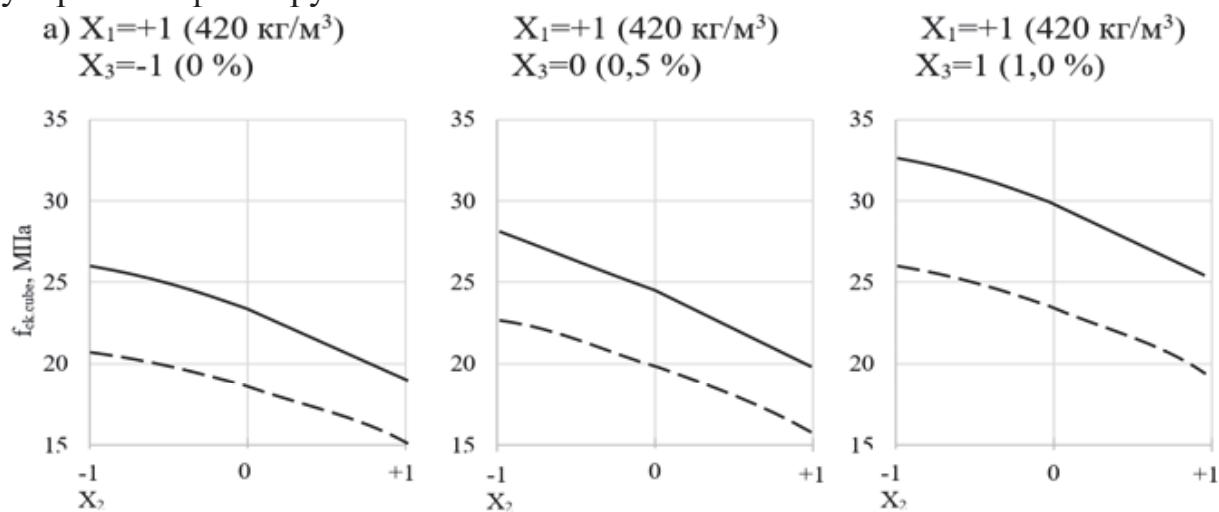


Рис.1 Вплив вмісту меленого піску X_2 у змішаному в'яжучому на міцність бетону:

- - бетон на механоактивованому змішаному в'яжучому;
- - бетон на змішаному в'яжучому, яке не підлягало механоактивації (контроль)

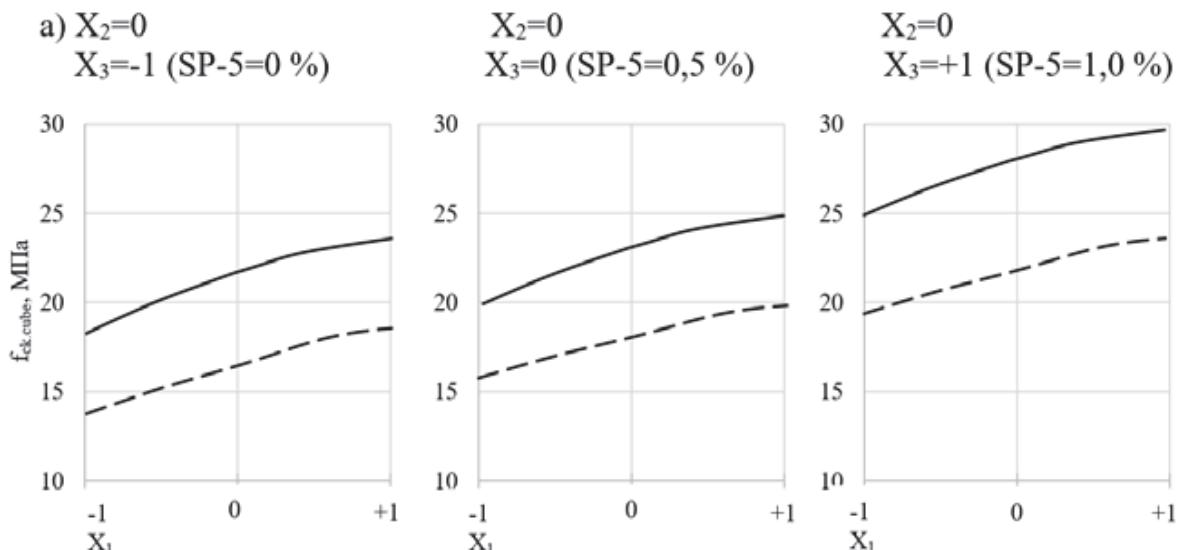


Рис.2 Вплив вмісту змішаного в'яжучого X_1 на міцність бетону:

- бетон на механоактивованому змішаному в'яжучому;
- - - бетон на змішаному в'яжучому, яке не підлягало механоактивації (контроль)

Зафіксувавши фактор X_2 на нульовому рівні отримуємо графічні залежності, які наведені на рис 2.

Розгляд графічних залежностей дозволяє зробити висновок про те, що сумісне використання механоактивації в присутності 1 % SP-5 дозволяє підвищити міцність бетону в марочному віці (в порівнянні з контролем - механоактивація відсутня, витрата SP-5 = 0 %) з 18,3 до 29,8 МПа, тобто більше ніж на 60 %.

Висновки і рекомендації:

1. Механохімічна активація в'яжучого є дієвим технологічним прийомом, який дозволяє, за інших рівних умовах, підвищувати міцність бетону як у ранньому (3 доби) так і в марочному віці.
2. Механохімічна активація змішаного в'яжучого в поєданні з суперпластифікуючою добавкою SP-5 (1 %) забезпечує зростання міцності бетону в марочному віці (в порівнянні з контролем) більш ніж на 60 %.

1. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк У.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Монографія. Львів: ТОВ «Простір-М». 2021. 206с.

Sanytskyi M.A., Kropyvnytska T.P., Heviuk U.M. Shvidkotverdnuchi klinker-efektyvni tsementy ta betony. Monohrafiia. Lviv: TOV «Prostir-M». 2021. 206s.

2. Sanytskyi M., Kropyvnytska T., Ivashchyshyn H., Rykhlytska O. Eco-efficient blended cements with high volume of supplementary cementitious materials/ Budownictwo i Architektura. 2019. T.18(4). S.5-14.

3. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ. Аспект-Поліграф. 2010. 228 с.

Troian V.V. Dobavky dlja betoniv i budivelnykh rozchyniv. Kyiv. Aspekt- Polihraf. 2010. 228 s.

4. Токарчук В.В. Сокольцев В.Ю. Свідерський В.А. Особливості твердіння композиційних цементів з силікатними добавками різного походження. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. №3/11 (75). С.9-14.

Tokarchuk V.V. Sokoltsev V.Iu. Sviderskyi V.A. Osoblyvosti tverdinnia kompozitsiinykh tsementiv z silikatnymu dobavkamy riznoho pokhodzhennia. Skhidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2015. №3/11 (75). S.9-14.

5. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. та ін. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: Монографія. Рівне: НУВГП. 2017. 424с.

Dvorkin L.I., Zhytkovskyi V.V., Marchuk V.V. ta in. Efektyvni tekhnolohii betoniv ta rozchyniv iz zastosuvanniam tekhnogennoi syrovyny: Monohrafia. Rivne: NUVHP. 2017. 424s.

6. Саницький М.А., Соболь Х.С., Марків Т.С. Модифіковані композиційні цементи. Львів: Вид-во Львів. політехніки. 2010. 132 с.

Sanytskyi M.A., Sobol Kh.S., Markiv T.S. Modyifikovani kompozysiini tsementy. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniky. 2010. 132 s.

7. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ: КНУБА. 2007. 236с.

Runova R.F., Nosovskyi Yu.L. Tekhnolohiia modyifikovanykh budivelnykh rozchyniv. Kyiv: KNUBA. 2007. 236s.

8. Енергозберігаючі мінеральні в'яжучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі/ К.К. Пушкарьова, М.М. Зайченко, А.А. Плугін та ін. Монографія. Київ: Задруга. 2014. 272с.

Energozberihaiuchi mineralni viazhuchi rechovyny ta kompozysiini budivelni materialy na yikh osnovi/ K.K. Pushkarova, M.M. Zaichenko, A.A. Pluhin ta in. Monohrafia. Kyiv: Zadruha. 2014. 272s.

9. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. та ін. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: Монографія. Рівне: НУВГП. 2017. 424с.

Dvorkin L.I., Zhytkovskyi V.V., Marchuk V.V. ta in. Efektyvni tekhnolohii betoniv ta rozchyniv iz zastosuvanniam tekhnogennoi syrovyny: Monohrafia. Rivne: NUVHP. 2017. 424s.

10. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'яжучих речовин: Навч. посібник. Одеса : «Астропрінт». 2002. 156 с.

Barabash I.V. Mekhanokhimichna aktyvatsiia mineralnykh viazhuchykh rechovyn: Navch. posibnyk. Odesa : «Astroprynt». 2002. 156 s.

11. Шпирько М.В., Дубов Т.М. Дослідження впливу електромагнітної активації концентрованої цементної суспензії на властивості цементного каменю та бетону. Вісник Приднепровської державної академії будівництва та архітектури. 2020, №2 (263-264) с. 102-107.

Shpyrko M.V., Dubov T.M. Doslidzhennia vplyvu elektromagnitnoi aktyvatsii kontsentrovanoi tsementnoi suspenzii na vlastyvosti tsementnoho kameniu ta betonu. Visnyk Prydneprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury. 2020, №2 (263-264) s. 102-107.

12. Гаращенко Д.П. Дисперсно-армований самоущільнюючий бетон на механоактивованому портландцементі: дисерт. на здобуття наук. ст. к.т.н.: 05.23.05. Одеса, 2021.156c.

Harashchenko D.P. Dyspersno-armovanyi samoushchilniuiuchyi beton na mekhanoaktyvovanomu portlandtsementi: dysert. na zdobuttia nauk. st. k.t.n.: 05.23.05. Odesa, 2021.156s.