



Дворкін Л. Й.



Бордюженко О.М.



Макаренко Р. М.

**Дворкін Л. Й.,**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства,  
Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028  
✉ dvorkin.leonid@gmail.com ☎ +38 (068) 353 33 38  
ORCID: 0000-0001-8759-6318

**Бордюженко О. М.,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства,  
Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028  
✉ bord@nuwm.edu.ua ☎ +38 (067) 528 73 31  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

**Макаренко Р. М.,**

кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри промислового,  
цивільного будівництва та інженерних споруд, Національний університет водного господарства та природокористування  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028  
✉ r.m.makarenko@nuwm.edu.ua ☎ +38 (050) 774 85 33  
ORCID: 0000-0003-4839-9623

**Leonid Dvorkin,**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Department of Construction Technology and Materials Science,  
National University of Water and Environmental Engineering,  
Soborna str., 11, Rivne, Ukraine, 33028  
✉ dvorkin.leonid@gmail.com ☎ +38 (068) 353 33 38  
ORCID: 0000-0001-8759-6318

**Oleh Bordiuzhenko,**

PhD, Associate professor  
Department of Construction Technology and Materials Science,  
National University of Water and Environmental Engineering,  
Soborna str., 11, Rivne, Ukraine, 33028  
✉ bord@nuwm.edu.ua ☎ +38 (067) 528 73 31  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

**Ruslan Makarenko,**

PhD, Professor  
Department of industrial, civil construction and engineering structures,  
National University of Water and Environmental Engineering  
Soborna str., 11, Rivne, Ukraine, 33028  
✉ r.m.makarenko@nuwm.edu.ua ☎ +38 (050) 774 85 33  
ORCID: 0000-0003-4839-9623

## ВЛАСТИВОСТІ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ БЕТОНІВ ІЗ ДОБАВКОЮ ПОЛІМЕРУ

### PROPERTIES OF FINE-GRAINED SELF-COMPACTING CONCRETE WITH POLYMER ADDITIVE

**Анотація.** Наведено результати досліджень властивостей самоущільнювальних дрібнозернистих бетонів з використанням поліфункціонального модифікатора. Показано, що при оптимальному складі та вмісті такого модифікатора, що включає в себе полівінілацетатну дисперсію та суперпластифікатор, стає можливим суттєво покращити властивості самоущільнювальних бетонів.

**Ключові слова:** Самоущільнювальний бетон, поліфункціональний модифікатор, полівінілацетатна дисперсія, міцність, водопоглинання, стиранисть.

**Abstract.** The results of studies of the properties of self-compacting fine-grained concrete using a polyfunctional modifier are presented. It is shown that at the optimal composition and content of such a modifier, which includes a polyvinyl acetate dispersion and a superplasticizer, it becomes possible to significantly improve the properties of self-compacting concrete.

**Keywords:** Self-compacting concrete, polyfunctional modifier, polyvinyl acetate dispersion, strength, water absorption, abrasion.

#### Вступ. Аналіз досліджень

Внаслідок низької деформативності а також міцності при розтягу звичайний важкий бетон часто не може забезпечити достатню тріщиностійкість. Деформативність та міцність цементних бетонів та розчинів на розтяг можна суттєво підвищити за рахунок застосування полімерних добавок, що надає таким матеріалом суттєві переваги [1-6].

Зниження проникності цементного каменю може відбуватись за рахунок застосування полімерних добавок, що покращують порову систему. При цьому закономірно, що бетон з добавкою ПВА проявляє меншу проникність і більшу стійкість при насиченні неполярними рідинами, а з добавками каучуків і інших неполярних полімерів, водою і іншими полярними рідинами. Даний висновок є справедливим і щодо стійкості модифікованих бетонів і розчинів по відношенню до агресивної дії різних хімічних речовин [7].

Наповнення пор полімерами а також додаткове повітровтягання призводить, як відзначає більшість дослідників [8, 9], до підвищення морозостійкості бетонів та розчинів. Робота Намікі і Охама [10] представляє результати вивчення стійкості зразків модифікованих розчинів, вкладених на звичайний цементний розчин після 10-річної дії зовнішнього середовища в умовах Токіо. У порівнянні зі зразками, які були склеєні немодифікованими розчинами та випробувані після одного року перебування за нормальних умов, більшість зразків, зв'язаних модифікованими розчинами після 10 років, все ще були в задовільному стані за тих же умов.

Охама відзначає також [10], що переважна більшість модифікованих розчинів мають хорошу стійкість до карбонізації ат-

мосферним вуглекислим газом, що допомагає запобігати корозії сталевій арматури.

Модифікуючи властивості затверділих бетонів і розчинів, полімерні добавки істотно впливають на реологічні та технологічні властивості цементних сумішей.

При низьких полімерцементних співвідношеннях вододисперговані та водорозчинні полімери зазвичай мають пластифікуючий і повітровтягаючий ефект [8]. Модифіковані цементні суміші якісно відрізняються від звичайних цементних сумішей підвищеною водоутримуючою здатністю, яка зростає зі збільшенням співвідношення полімеру до цементу [11].

Останніми десятиліттями все ширше впроваджуються у будівельну практику самоущільнювальні бетонні суміші, які особливо ефективні для бетонування тонкостінних густоармованих конструкцій та влаштування наливних підлог. Для цих сумішей особливо ефективними є добавки, які, поряд з підвищенням пластичності та зниженням водопотреби, позитивно впливають на водоутримуючу здатність, збереження їх легкоукладальності в часі та на комплекс будівельно-технічних властивостей.

Аналіз існуючих відомостей про самоущільнювальні дрібнозернисті бетони показує, що одним із ефективних шляхів покращення їх технічних властивостей є застосування поліфункціональних модифікаторів (ПФМ), що містять суперпластифікатори та полімери.

Метою роботи було дослідження міцнісних та деформативних властивостей самоущільнювальних дрібнозернистих бетонів з використанням ПФМ, що призначені для влаштування наливних підлог.

**Матеріали та методи досліджень**

В дослідженнях використовували портландцемент Здолбунівського «ВАТ Волинь-цемент» СЕМ І 42,5 R, з нормальною густиною 26,8%, золу-виносу Ладиженської ТЕС з питомою поверхнею 3100 см<sup>2</sup>/г і суміш кварцового піску з двома фракціями 0,16...2 мм та 2...5 мм у співвідношенні 0,8:0,2 з модулем крупності 2,15 та водопотребою 8,5%. Витрата в'язучого (суміш цементу і золи у співвідношенні 0,7:0,3) складала 575 кг/м<sup>3</sup>.

В якості полімерного компоненту ПФМ використовували полівінілацетатну дисперсію (ПВАД) — водну емульсію термопластичного полярного полімеру ПВА. Композиція суперпластифікатор (СП) — ПВАД у бетонну суміш вводилась з водою затворення. Суперпластифікатор був представлений добавкою полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Витрату води доводили до значення розпливу дрібнозернистої бетонної суміші 550...600 мм (клас SF1 за EN 12350-8). При такому розпливі, як показали попередні досліди, осадка стандартного конуса складає 26...27 см.

Виготовляли зразки-призми 4×4×16 см для дослідження міцності при стиску ( $f_{ct}$ ), міцності на розтяг при згині ( $f_{sr}$ ) і водопоглинання (W), а також зразки-куби з розміром ребра 7,07 см для визначення стиранисті бетону. Зразки тверділи до моменту проведення випробувань у повітряно-вологих умовах при 20±2° С.

Міцнісні характеристики зразків бетону визначали за ДСТУ Б В.2.7-224:2009, водопоглинання — за ДСТУ Б В.2.7-170:2008, стиранистість — за ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Досліди по визначенню міцності проводили на зразках у віці 7, 28 і 90 діб.

Для розрахунку складу бетону в кожній точці матриці приймали певний об'єм бетонної суміші, що відповідав об'єму замісу. Згідно умов планування експерименту знаходили об'єм заповнювача та в'язучого. Відповідно до прийнятого золо-цементного відношення знаходили об'єм цементу і золи. Витрату компонентів на 1 м<sup>3</sup> бетонної суміші знаходили з врахуванням їх густини.

**Експериментальні результати та їх аналіз**

Для дослідження впливу вмісту і складу ПФМ на вказані вище властивості самоущільнювальних золо-цементних бетонів, були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого трьохфакторного плану В<sub>3</sub> [12]. Умови планування експериментів наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Умови планування експерименту

№ з/п	Фактори	Кодоване значення	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
1	Вміст ПФМ, % від маси в'язучого	X <sub>1</sub>	0,5	1,75	3
2	Масова частка СП у складі ПФМ	X <sub>2</sub>	0	0,5	1,0
3	Водо-в'язуче відношення	X <sub>3</sub>	0,3	0,4	0,5

У результаті статистичного опрацювання отримані рівняння регресії (математичні моделі) показників властивостей самоущільнювальних бетонів (СУБ) у 28-добовому віці, що адекватні при 95%-й довірчій ймовірності та приведені в кодованих змінних у табл. 2.

Рівняння регресії властивостей СУБ з ПФМ

№	Вихідний параметр	Рівняння регресії
1	Границя міцності при стиску ( $f_{ct}$ ), МПа	$f_{ct} = 62.56 + 1.75X_1 + 6.12X_2 - 20.06X_3 - 1.946X_1^2 - 1.85X_2^2 + 5.2X_3^2 + 6.72X_1X_2 - 1.51X_1X_3$ (1)
2	Границя міцності при згині ( $f_{sr}$ ), МПа	$f_{sr} = 7.8 + 0.4X_1 - 0.23X_2 - 0.95X_3 + 0.09X_1^2 - 0.88X_2^2 - 0.44X_3^2 + 0.472X_1X_2$ (2)
3	Водопоглинання (W), %	$W = 6.64 - 0.21X_1 - 0.57X_2 + 2.47X_3 + 0.15X_1^2 + 0.10X_2^2 - 0.20X_3^2 - 0.29X_1X_2$ (3)
4	Стиранистість (St), г/см <sup>2</sup>	$St = 0.49 - 0.09X_1 + 0.08X_2 + 0.15X_3 + 0.06X_1^2 + 0.03X_2^2 + 0.04X_3^2 + 0.05X_1X_2 + 0.04X_2X_3$ (4)

Для міцності СУБ при стиску і згині (рис. 1, 2), як і слід було очікувати, із досліджуваних факторів найбільш значимим виявилось водо-в'язуче відношення (X<sub>3</sub>). При цьому характерно, що для бетонів із добавкою ПФМ, так як і для звичайних цементно-піщаних розчинів [13], збільшення В/Ц веде до значно більш істотного падіння міцності при стиску ніж міцності на розтяг при згині.

Збільшення вмісту ПФМ (X<sub>1</sub>) при В/Ц = const може сприяти або збільшенню, або зменшенню міцності на стиск СУБ в залежності від складу композиційної добавки. У тому випадку, коли ПФМ представлений тільки суперпластифікатором Melflux, збільшення його вмісту при постійному В/Ц призводить до суттєвого підвищення міцності.

Інший характер впливу на міцність при стиску другого компонента ПФМ — полівінілацетатної добавки. У обраній області варіювання збільшення її вмісту, особливо від 1,5 до 3%, призводить до істотного падіння величини  $f_{ct}$  (рис. 1). Уповільнення процесу наростання міцності полімерцементів спостерігалось й іншими дослідниками [5].

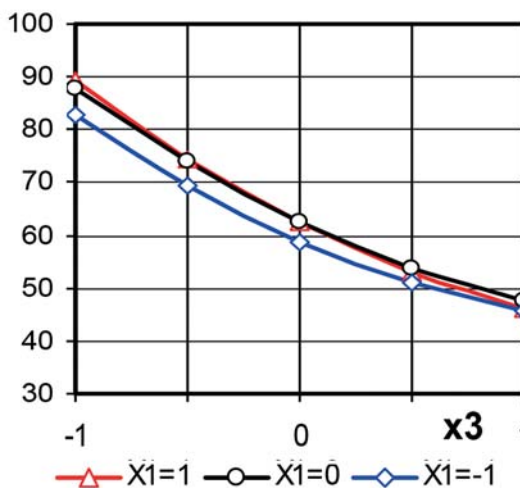
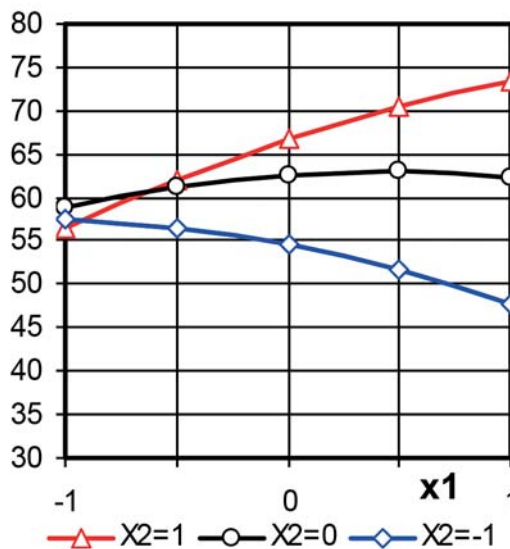


Рис. 1. Залежності міцності при стиску (МПа) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % від маси цементу (X<sub>1</sub>); масової частки СП у складі ПФМ (X<sub>2</sub>); В/Ц (X<sub>3</sub>)

Таблиця 2.

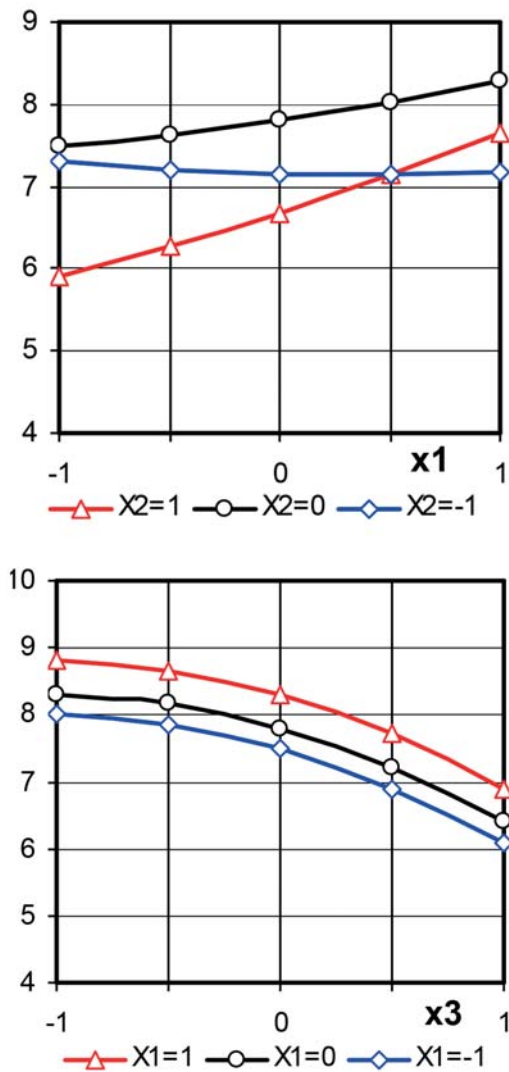


Рис. 2. Залежності міцності при згині (МПа) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % від маси цементу ( $X_1$ ); масової частки СП у складі ПФМ ( $X_2$ ); В/Ц ( $X_3$ )

Вплив досліджуваних ПФМ на міцність СУБ при згині (рис. 2) має ряд особливостей. Найбільше інтенсивно  $f_{зг}$  у досліджуваній області дозувань ПФМ росте в тих випадках, коли добавка представлена лише суперпластифікатором Melflux. Проте абсолютні значення міцності на згин залишаються більш високими при використанні ПФМ із максимальною масовою часткою СП не більше 0,5. Отримані дані показують, що в області порівняно невисоких досліджуваних концентрацій ПВАД відчувається її помітний позитивний вплив на  $f_{зг}$  самоущільнюваних бетонів. Відповідно знижується і співвідношення  $f_{ст} / f_{зг}$ . Розрахункові співвідношення  $f_{ст} / f_{зг}$  для СУБ із добавкою ПФМ при різних значеннях досліджуваних факторів, отримані з використанням відповідних рівнянь регресії, наведені в табл. 3.

Таблиця 3.

Розрахункові співвідношення  $f_{ст} / f_{зг}$  для СУБ із добавкою ПФМ

№ з/п	Натуральні значення факторів			$f_{ст} / f_{зг}$		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	7 діб	28 діб	90 діб
1	3	1	0,5	5,8	6,6	7,1
2	3	0	0,5	3,5	4,9	4,8
3	0,5	1	0,5	5,7	6,9	7,6
4	0,5	0	0,5	4,1	5,5	5,4
5	3	1	0,3	8,8	9,1	9,3
6	3	0	0,3	6,7	7,0	6,5
7	0,5	1	0,3	9,8	9,4	9,6
8	0,5	0	0,3	7,8	8,6	7,6

Аналіз даних табл. 3 показує, що тенденція до зниження  $f_{ст} / f_{зг}$  проявляється в міру зростання як загального вмісту ПФМ, так і збільшення в останньому частки полімерного компоненту. Параметр  $f_{ст} / f_{зг}$  до певної міри характеризує досконалість структури композиційного матеріалу. Можна припустити, що більш низькі відношення  $f_{ст} / f_{зг}$  СУБ із добавкою ПФМ обумовлені адсорбційним модифікуванням структури цементного каменю. Відомо [14–16], що адсорбційною здатністю стосовно полярних поверхонь гідратних новоутворень володіють як СП, так і полівінілацетатний полімер. Останній при достатній кількості утворює, крім того, суцільну плівкову матрицю, що також сприяє підвищеній міцності цементного каменю на розтяг і згин [17].

Для бетону без добавок і з пониженим вмістом ПФМ, особливо при переважанні СП, характерна тенденція до збільшення  $f_{ст} / f_{зг}$  із переходом бетону від раннього до більш пізнього віку. При рості вмісту ПФМ і частки в ньому полімерного компонента співвідношення міцнісних параметрів стабілізується в часі, або навіть може спостерігатися тенденція до зниження  $f_{ст} / f_{зг}$ .

Зміна водопоглинання СУБ із добавками ПФМ по мірі зміни їх складу (рис. 3) добре корелює з міцністю при стиску, що природньо пояснюється близькою залежністю обох властивостей від відкритої пористості бетону. Із збільшенням В/Ц від 0,3 до 0,5 водопоглинання збільшується практично лінійно. При цьому найменше водопоглинання має бетон, що містить у якості добавки тільки суперпластифікатор. Збільшення вмісту ПФМ у бетоні від 0,5 до 3% при В/Ц = 0,4 ( $X_3 = 0$ ) дозволяє зменшити, наприклад, водопоглинання з 8 до 6,5%, тобто на 18,7%.

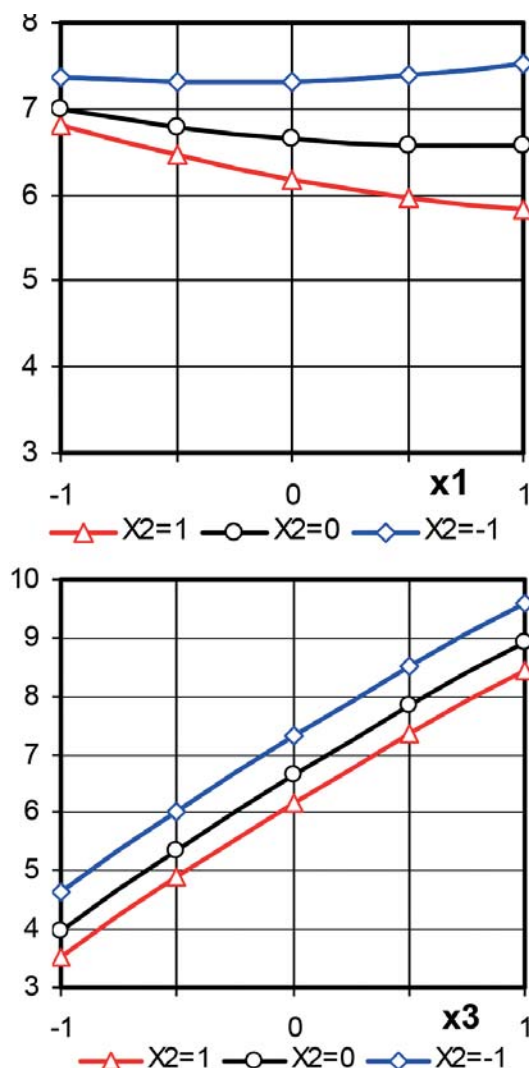


Рис. 3. Залежності водопоглинання (% за масою) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів



Однією із найбільш істотних переваг бетонів з добавками полімерів є їх знижена стираність. Як показали наші досліді (рис. 4), істотний позитивний ефект ПВАД на стираність виявляється і при низьких значеннях полімерцементного відношення (П/Ц). При П/Ц = 0,005 і В/Ц = 0,3 розрахункова стираність СУБ складає 0,53 г/см<sup>2</sup>, у той же час як зростання П/Ц до 0,03 зменшує стираність до 0,35 г/см<sup>2</sup>, тобто на 34%. Додаткові досліді показали, що стираність СУБ без добавок склала 0,83 г/см<sup>2</sup>.

Аналіз отриманого комплексу рівнянь регресії показує, що сумарний вплив компонентів досліджуваних ПФМ є, як правило, адитивним. Вибір складу ПФМ має визначатися як нормованими властивостями бетону, так і техніко-економічними міркуваннями.

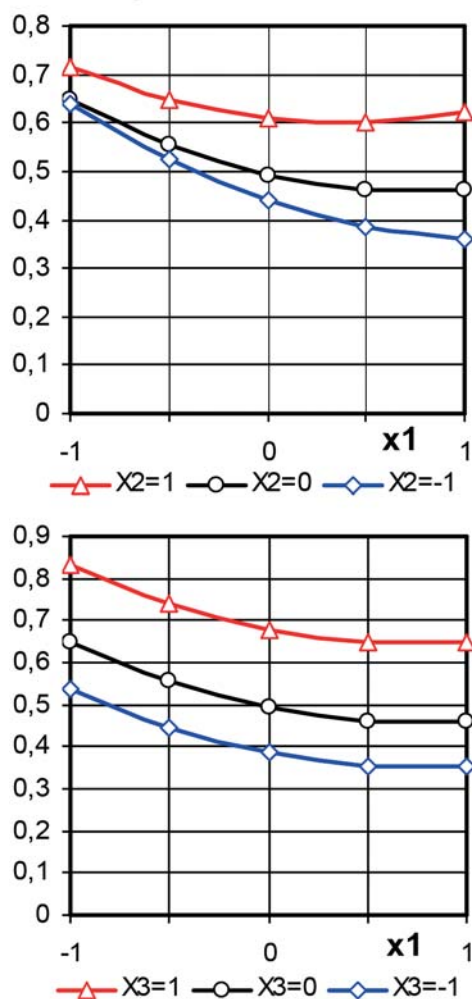


Рис. 4. Залежності стираності (г/см<sup>2</sup>) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів

#### Висновки

1. Встановлено можливість модифікування самоущільнювальних дрібнозернистих бетонних сумішей поліфункціональними модифікаторами (ПФМ), що дозволяє покращити їх технічні властивості.
2. Збільшення вмісту ПФМ у СУБ, як і частки полімеру в ПФМ, дозволяє зменшити відношення міцності при стиску до міцності при згині, що опосередковано може свідчити про покращення деформативних властивостей бетонів.
3. ПФМ, що включає полікарбоксилатний суперпластифікатор Melflux 2651f і полівінілацетатну дисперсію дозволяє зменшити водопоглинання самоущільнювальних бетонів та істотно знижує їх стираність.

#### Література:

1. Саталкин А.В., Солнцева В.А., Панова О.С. Цементно-полимерные бетоны. М.: Стройиздат, 1971. 169 с.
2. Baydjanov D.O., Abdrakhmanova K.A., Kropachev P.A., Rakhimova G.M. Modified concrete for producing pile foundations. Magazine of Civil Engineering. 2019. 86(2). Pp. 3–10. DOI: 10.18720/MCE.86.1.
3. Ohama Y. Development of concrete-polymer materials in Japan. Proceedings of the Second international congress on polymers in concrete. Austin. 1978 P. 128–135.
4. Brachaczek W., Chlebos A., Giergiczny Z. Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars. Materials. 2021, 14, 7558. DOI.org/10.3390/ma14247558.
5. Z. Su, J.M. Bijen, J.A. Larbi. Influence of polymer modification on the hydration of portland cement. Cement and Concrete Research. Volume 21, Issues 2–3, March–May 1991, Pages 242–250. DOI.org/10.1016/0008-8846(91)90004-2
6. Sih Wuri Andayani, Rochim Suratman, Iswandi Imran, Mardiyati. Polymer Modified Concrete of Blended Cement and Natural Latex Copolymer: Static and Dynamic Analysis / Open Journal of Civil Engineering. Vol.8, No.2, 2018. DOI: 10.4236/ojce.2018.82016.
7. Pshinko O.M., Krasniuk A.V., Klochko B.H., Hromova O.V., Palii V.V. Repair material modification by polymeric additives while transport repairing of buildings and engineering structures. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, (35), 2010. 145–149. DOI.org/10.15802/stp2010/8884.
8. Добавки в бетон / Рамачандран В. С., Фельдман Р. Ф., Коллепарди М. и др.; под ред. В.С. Рамачандрана. М.: Стройиздат, 1988. 575 с.
9. Баженов Ю. М. Бетонополимеры. М.: Стройиздат, 1983. 472 с.
10. Namiki M., Ohama Y. Plastics concrete in Japanese. Kyoto: Kobunshi — Kankokai. 1965. 210 p.
11. Соломатов В.И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны. М.: Стройиздат, 1967. 184 с.
12. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York. 2013. 223 p.
13. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals / K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, T. Enohata. Cem. Concr. Res. 2002. Vol. 32, No 10. P. 1507–1513.
14. Q. Wang, C. Taviot-Gueho, F. Leroux, K. Ballerat-Busserolles, C. Bigot, Superplasticizer to layered calcium aluminate hydrate interface characterized using model organic molecules, Cement and Concrete Research, 2018, 110, 52–69.
15. M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas, Effect of Polycarboxylate-Ether Admixtures on Calcium Aluminate Cement Pastes, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52, 17330-17340.
16. J. Plank, C. Hirsch, Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption, Cement and Concrete Research, 2007, 37, 4, 537–542.
17. X.-M. Kong, C.-C. Wua, Y.-R. Zhang, and J.-L. Li, «Polymer-modified mortar with a gradient polymer distribution: preparation, permeability, and mechanical behaviour», Construct. Building Mater., vol. 38, pp. 195–203, 2013.