

УДК 666.972.16

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ САМОНАПРУЖЕНОГО БЕТОНУ

Кандидати техн. наук Є. І. Галагура, О. А. Беліченко, М. В. Павлюченко,
Л. Б. Кравців, асп. І. В. Биченок

EXPERIMENTAL STUDIES OF SELF-STRESSED CONCRETE

PhD (Tech.) E. Galagurya, PhD (Tech.) O. Belichenko, PhD (Tech.) M. Pavliuchenkov,
PhD (Tech.) L. Kravtsiv, postgraduate student I. Buchenok

Анотація. У статті розглянуто лабораторні дослідження самонапружених бетонних зразків. Для цього було виготовлено та випробувано п'ять серій призм та кубиків з різним складом. На наступному етапі дослідження було випробувано зразки на фізико-механічні характеристики та компоненти на рН-метрів. Для цього випробувано водні розчини добавок і суспензій цементу вибраних компонентів на рН і ЕРС.

Ключові слова: самонапружений бетон, самонапруження, попереднє напруження, рН-метрів.

Abstract. *The paper considers the test results self-stressed concrete.*

In previous studies, it was noted that if the required level of pre-stress of concrete is provided, that is, at the level of a certain effective value, which depends on the structural and strength parameters of the structural element, then in the limit state it is possible to fully use the strength properties of steel, and the concrete core operates in a three-axis stress state under compression with extreme values of longitudinal and radial stress. Therefore, it is necessary to study different compositions of self-stressed concrete. To achieve this goal, five series of prisms with different compositions were manufactured and tested. According to the results of experimental studies, it was found that the first, fourth and fifth series of prisms corresponds to the self-stress brand Sp 1.2 and is self-stressed concrete the second series of prisms does not correspond to any of the self-stress brands due to the high content of Portland cement, the third series of prisms corresponds to the self-stress brand Sp 0.6 and is non-shrinkable concrete. Since the selected concrete is planned to be used as the core of a steel concrete column it is advisable to check the ph metric of the given components.

At the next stage of the study, the cement of the selected components was tested for ph-metry. For this purpose, aqueous solutions of cement additives and suspensions of selected components were tested for pH and EMF. As a result, possible inhibition of metal corrosion is also confirmed by high pH values of the liquid phase at the level of 8.25 1 13.85 (which is significantly higher than neutral pH = 7) in the presence of both individual additives and cement suspensions containing additives. Therefore, the use of self-stressed concrete with these additives is advisable.

Keywords: *Self-stressed concrete, self-stress, prestressing, ph-metric.*

Вступ. У дослідженнях [1–7] зазначено, якщо забезпечено необхідний рівень попереднього напруження бетону, тобто на рівні певного ефективного значення, яке залежить від конструктивних та міцнісних параметрів елемента конструкції, то в граничному стані можливим є повне використання міцнісних властивостей сталі, а бетонне ядро працює в умовах тривісного напруженого стану при стиску з екстремальними значеннями поздовжнього та радіального напруження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням самоупругого бетону присвячено роботи [1–4]. В роботі [1] наведено результати досліджень міцності і деформаційних характеристик напруженого цементу, модифікованого добавкою нітрату кальцію. Застосування напруженого цементу без модифікуючих добавок, склад якого підібраний за стандартною методикою, в умовах низьких позитивних температур твердіння обмежено внаслідок можливого руйнування на початкових етапах. У ході досліджень установлено, що використання напруженого цементу з добавкою нітрату кальцію дає

зможу отримати стабільне кероване самоупругення як для нормальних, так і для низьких позитивних температур твердіння; виявлено, що введення добавки нітрату кальцію дає змогу підвищити межу міцності при стисненні на 15...20 % та отримати енергію самоупругення від 2 до 3 МПа в умовах низьких позитивних температур. У роботах [2, 3] описано експериментальні дослідження самоупругених сталетруبوبетонних елементів, які свідчать про ефективність застосування комплексної добавки для отримання самоупругених сталетруبوبетонних елементів. При цьому можливо отримувати необхідну величину самоупругення бетону, варіюючи кількісний склад напруженого цементу і його витрати. Застосування комплексної розширюючої добавки дало змогу вирішити основну проблему використання класичних напружених цементів і бетонів на їх основі в труبوبетоні – зростання власних деформацій в умовах ізоляції без доступу додаткової вільної води в процесі гідратації, необхідної для перекристалізації моносульфату в етtringіт. У роботі [4] розглянуто властивості самоупругеного бетону в

різних обмежувальних умовах. Дослідженням напруженого бетону, отриманого шляхом фізичного впливу на бетонну суміш, присвячено роботи [5–7]. У роботі [6] запропоновано спосіб виготовлення трубобетонних елементів, який дає змогу завдяки послідовному введенню в бетонну суміш внутрішніх сталевих сердечників створювати в ній пресуючий тиск, відводити з неї віджату воду і виключити ефект розпресування, що виявляється при пресуванні за допомогою пустотоутворювачів. Це дає можливість на рядових цементах і заповнювачах отримувати високоміцні бетони і створювати попереднє обтиснення бетонного ядра величиною близько 2,5–3 МПа, завдяки чому істотно підвищується міцність трубобетонних елементів. У роботі [7] розглянуто три способи отримання внутрішнього напруження в сталевій оболонці: тривалим пресуванням бетонної суміші за допомогою пустотоутворювача спеціальної конструкції; пресуванням бетонної суміші послідовним вдавленням в неї сталевих трубок уздовж прямого стержня; з використанням енергії напруженого цементу. Отримано внутрішні обтиснення бетонного ядра: за допомогою пустотоутворювача 2–3 МПа; спеціальної конструкції при тривалому пресуванні бетонної суміші на рівні 1,5–3 МПа; з використанням енергії напруженого цементу 1,5–2 МПа.

Але не всі питання вирішено. Зокрема, не відомо, яка корозійна стійкість металу при використанні самонапруженого бетону як ядра.

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідити різні склади самонапруженого бетону для отримання даних про самонапруження, фізико-механічні характеристики, а також корозійну стійкість для використання самонапруженого бетону як ядра сталобетонної колони.

Для досягнення цієї мети необхідно провести лабораторні випробовування зразків на самонапруження, фізико-механічні характеристики та порівняти ці дані з нормативними. Також необхідно провести випробовування компонентів на рН-метрію для отримання даних про корозійну стійкість металу.

Основна частина дослідження. Випробовування на самонапруження проводилися згідно з методикою, наведеною у [8].

За результатами випробовування було отримано дані, які наведено в табл. 1–5.

Було виготовлено п'ять серій призм. Перша серія виготовлялася за методикою [1, 9] зі складом на 1 м³: напружений цемент (портландцемент М400 – 83 %, глиноземистий цемент ГЦ-40 – 10 %, гіпс будівельний – 7 %) – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода – 250 л.

Таблиця 1

Результати вимірювання першої серії призм

Доба	Показання індикатора	Δ	Самонапруження RR_{bbs} , МПа
1	0	0	0
2	0.011	0.022	0.131
3	0.021	0.042	0.251
4	0.031	0.062	0.37
5	0.04	0.08	0.477
6	0.045	0.09	0.537
7	0.048	0.096	0.573
10	0.062	0.124	0.74
14	0.081	0.162	0.966
28	0.088	0.176	1.05

Друга серія призм виготовлена за технологією ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м³: портландцемент М400 – 562.5 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг;

вода – 250 л (до бетону додавалися наступні добавки: Dynamon SR3 – 5.625 кг; Маресуре SRA – 6.25 кг; Expancrete – 37.5 кг).

Таблиця 2

Результати вимірювання другої серії призм

Доба	Показання індикатора	Δ	Самонапруження RR_{bbs} , МПа
1	0	0	0
2	0.001	0.002	0.0105
3	0.0025	0.005	0.02625
4	0.003	0.006	0.0315
5	0.0035	0.007	0.03675
6	0.004	0.008	0.042
7	0.005	0.01	0.0525
10	0.006	0.012	0.063
14	0.007	0.014	0.0735
28	0.01	0.02	0.105

Третя серія призм – бетон підібраний згідно з [9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м³: портландцемент М400 – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр.

5–10 – 1250 кг; вода – 250 л (до бетону додавалися такі добавки: Dynamon SR3 – 4.117 кг; Маресуре SRA – 4.569 кг; Expancrete – 27.5 кг).

Таблиця 3

Результати вимірювання третьої серії призм

Доба	Показання індикатора	Δ	Самонапруження RR_{bbs} , МПа
1	0	0	0
2	0.008	0.016	0.084
3	0.011	0.022	0.1155
4	0.015	0.03	0.1575
5	0.019	0.038	0.1995
6	0.02	0.04	0.21
7	0.023	0.046	0.2415
10	0.028	0.056	0.294
14	0.033	0.066	0.3465
28	0.047	0.094	0.4935

Четверта серія призм – бетон підібраний згідно з [1, 9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м³: напружений цемент – 496 кг; пісок річковий – 875 кг;

щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода– 250 л (до бетону додавалися такі добавки: Маресуре SRA – 4.569 кг; Dynamon SR3 – 4.117 кг.

Таблиця 4
Результати вимірювання четвертої серії призм

Доба	Показання індикатора	Δ	Самонапруження RR_{bbs} , МПа
1	0	0	0
2	0.01	0.02	0.119
3	0.017	0.034	0.203
4	0.029	0.058	0.346
5	0.035	0.07	0.418
6	0.039	0.078	0.465
7	0.04	0.08	0.477
10	0.059	0.118	0.704
14	0.073	0.146	0.871
28	0.081	0.162	0.966

П'ята серія призм – бетон підібраний згідно з [1, 9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м³: напружений цемент – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода – 250 л (до бетону

додавалися такі добавки: Маресуре SRA – 4.569 кг; Dynamon SR3 – 4.117 кг.

За отриманими результатами побудовано графіки набору самонапруження (рис. 1).

Таблиця 5
Результати вимірювання п'ятої серії призм

Доба	Показання індикатора	Δ	Самонапруження RR_{bbs} , МПа
1	0	0	0
2	0.015	0.03	0.179
3	0.02	0.04	0.239
4	0.03	0.06	0.358
5	0.035	0.07	0.418
6	0.039	0.078	0.465
7	0.042	0.084	0.501
10	0.06	0.12	0.716
14	0.075	0.15	0.895
28	0.083	0.166	0.99

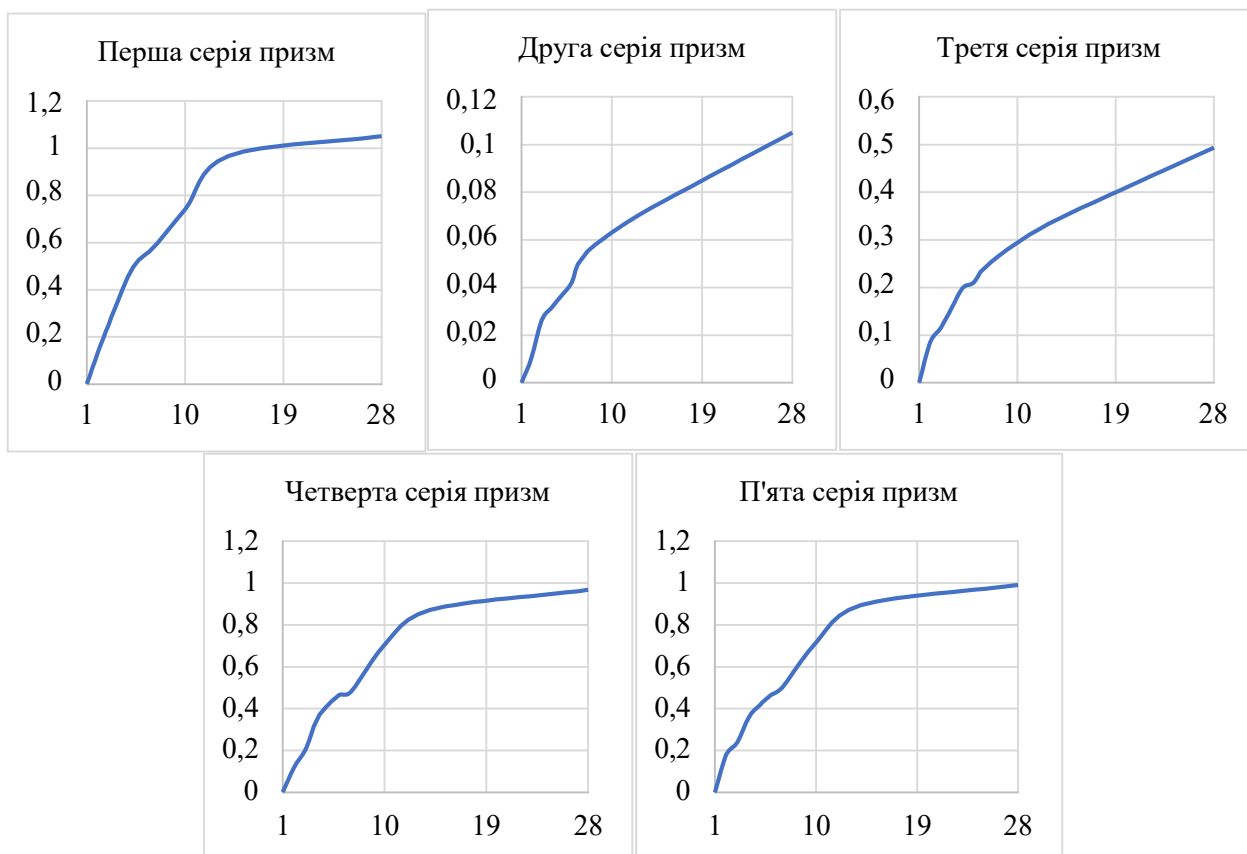


Рис. 1. Графіки набору самонапруження

Для п'яти серій кубиків (С1-С5) та для п'яти серій призм (Р1-Р5) випробовування на фізико-механічні характеристики проводилися згідно з методикою, наведеною у [10, 11].

За результатами випробовування отримано фізико-механічні характеристики, наведені в табл. 6–10.

Перша серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С30/35, модуль пружності $E_{cm} = 34.9 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.187$

Друга серія отримана з такими характеристиками: високоміцний бетон,

модуль пружності $E_{cm} = 37.1 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.23$.

Третя серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С50/60, модуль пружності $E_{cm} = 33.4 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.21$.

Четверта серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С30/35, модуль пружності $E_{cm} = 34.7 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.197$.

П'ята серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С25/30, модуль пружності $E_{cm} = 32.5 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.195$.

Таблиця 6

Результати вимірювання першої серії

Параметр	С1-1, Р1-1	С1-2, Р1-2	С1-3, Р1-3
$f_c, \text{cube} / f_c, \text{prism}, \text{ МПа}$	40.2/34.8	37.9/32.3	42.2/33.5
$E_{cm} \cdot 10^3, \text{ МПа}$	34.9	35.8	35.3
ν	0.189	0.187	0.19

Таблиця 7

Результати вимірювання другої серії

Параметр	C2-1, P2-1	C2-2, P2-2	C2-3, P2-3
$f_c, \text{cube} / f_c, \text{prism}$, МПа	68.7/62.3	69.3/64.2	71.5/64
$E_{cm} 10^3$, МПа	37.1	38.3	37.2
ν	0.23	0.24	0.23

Таблиця 8

Результати вимірювання третьої серії

Параметр	C3-1, P3-1	C3-2, P3-2	C3-3, P3-3
$f_c, \text{cube} / f_c, \text{prism}$, МПа	61/58.7	60.1/58.4	60.2/58.9
$E_{cm} 10^3$, МПа	34.4	34.8	35
ν	0.21	0.22	0.21

Таблиця 9

Результати вимірювання четвертої серії

Параметр	C4-1, P4-1	C4-2, P4-2	C4-3, P4-3
$f_c, \text{cube} / f_c, \text{prism}$, МПа	37.3/35.1	36.6/34.8	36.1/34.9
$E_{cm} 10^3$, МПа	35.1	34.7	34.8
ν	0.197	0.2	0.198

Таблиця 10

Результати вимірювання п'ятої серії

Параметр	C5-1, P5-1	C5-2, P5-2	C5-3, P5-3
$f_c, \text{cube} / f_c, \text{prism}$, МПа	32.3/30.2	33.4/29.8	33.7/29.7
$E_{cm} 10^3$, МПа	32.5	33.1	32.7
ν	0.195	0.197	0.195

Оскільки бетон для першої, третьої, четвертої та п'ятої серій було підібрано для класу C20/25 то порівняно з експериментальними дослідженнями, які проводилися у [12], міцність самонапруженого бетону в середньому зросла для першої серії в 1.4 разу, для третьої серії – у 2.5 разу, для четвертої серії – в 1.5 разу і для п'ятої серії – в 1.3 разу.

Оскільки бетон, що підбирається, планується для використання як ядро сталобетонної колони, то доцільною є перевірка рН-метрії наведених компонентів і корозійної стійкості металу.

Випробовування рН і ЕРС проводили за допомогою приладу рН-метр рН-150МИ, який оснащено комбінованим електродом і

термометром (для вимірювання температури розчинів). Дані випробувань наведено в табл. 11.

Характеристики приладу. Діапазон вимірювань:

- показник активності іонів водню (рН): від -1 до +14, дискретність 0,01;

- окислювально-відновний потенціал або електрорушійна сила (ЕРС): від -2000 до +2000, дискретність 1;

- температура аналізованого середовища: від -10 до +100 °С.

У розчинів окислювально-відновний потенціал є мірою хімічної активності елементів або їх сполук в оборотних хімічних процесах, пов'язаних зі зміною заряду іонів у розчинах.

Для виготовлення водних розчинів добавок і суспензій цементу застосовували дистильовану воду. Вимірювання проводили при температурі водних розчинів добавок і суспензій цементу + 19 °С.

Після приготування водних розчинів добавок і суспензій цементу електродну систему занурювали в розчин і витримували 60 с, після чого записували показання приладу.

Таблиця 11

Результати вимірювань

№ з/п	Кількість і вид добавок	pH	ЕРС, mV
1	Вода дистильована	6,78	+ 44
2	3 %-й водний розчин Dynamon SX45	8,25	+ 32
3	3 %-й водний розчин Dynamon SX45 + 7,5 %-й Маресуре SRA	8,28	+ 30
4	3 % водний розчин Dynamon SX45 + 7,5 % Маресуре SRA + Expancrete	13,48	- 273
5	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400	13,46	- 271
6	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400 + Dynamon SX45 0,5 % від m _ц	13,48	- 272
7	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400 + Expancrete 5 % від m _ц	13,74	- 288
8	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2	13,58	- 278
9	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2+ Dynamon SX45 0,5 % від m _ц	13,54	- 275
10	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2 + Expancrete 5 % від m _ц	13,85	- 293

При зіткненні провідника першого роду (електрода) з полярним розчинником (водою) або розчином електроліту на границі електрод – рідина виникає подвійний електричний шар.

Якщо розглядати металеву обойму як електрод (позитивно заряджений електрод, тобто катод), то зміна знака ЕРС розчинів з позитивного на негативний свідчить про те, що біля поверхні металу виникає подвійний електричний шар.

Потенціалвизначальними іонами є іони металу, а протиіонами, зокрема які містяться в дифузному шарі ПЕШ, будуть частки добавки (або добавок). У такому разі відбуваються електрохімічні процеси відновлення, і розчинення іонів металу не відбувається (перехід іонів металу в розчин не відбувається), що означає відсутність корозії.

Якщо метал заряджений позитивно, то цемент і добавка є поставачальниками негативно заряджених іонів.

Перебіг реакції відновлення підтверджується зміною знака заряду ЕРС [13].

Висновки. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що перша, четверта і п'ята серії призм відповідають марці по самонапруженню Sp 1.2 і є самонапруженим бетоном, друга серія призм не відповідає жодній із марок по самонапруженню через великий вміст портландцементу, третя серія призм відповідає марці по самонапруженню Sp 0.6 і є безусадковим бетоном. Також за результатами випробовування на фізико-механічні характеристики було отримано що перша і четверта серії відповідають класу бетону С30/35, друга серія є високоміцним бетоном, третя серія відпо-

відає класу бетону C50/60, п'ята серія – клас бетону C25/30. Можливе інгібування корозії металу підтверджує також високі значення рН рідкої фази на рівні 8,25...13,85 (що значно вище нейтрального рН = 7) за наявності як окремо взятих добавок, так і

цементних суспензій, у яких містяться добавки. Тому використання самонапруженого бетону з наведеними добавками є доцільним для застосування як ядра сталевенної колони.

Список використаних джерел

1. Савеня Д. Н., Соловьев Д. А., Плосконосов В. Н. Особенности прочностных и деформационных характеристик напрягающего цемента, модифицированного добавкой нитрата кальция. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2009. № 6. С. 53–56.
2. Павлова И. П., Бондаренко В. М. Перспективы применения бетонов на напрягающем цементе при изготовлении сталебетонных элементов. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 664. С. 133–144.
3. Мартыросов Г. М., Шахворостов А. И. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе. *Бетон и железобетон*. 2001. № 4. С. 12–13.
4. Chang X., Huang C., Zhang P. Expansive behaviors of self-stressing concrete under different restraining conditions. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2011. 26(4). P. 780–785.
5. Харченко С. А. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных элементов с упрочненными ядрами: автореф. дисс... канд. техн. наук. Минск, 1987. 16 с.
6. Сахаров А. А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Самара, 1999. 23 с.
7. Кришан А. Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатом ядром: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск, 2011. 335 с.
8. Пособие к СНиП 2.03.01-84. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01-84). Москва, 1986. 49 с. (Информация и документация).
9. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 18 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 43 с. (Інформація та документація).
11. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 16 с. (Інформація та документація).
12. Berestianskaya S., Galagurya E., Opanasenko O., Berestianskaya A., Bychenok I. Experimental Studies of Fiber-Reinforced Concrete Prisms Exposed to High Temperatures. *Key Engineering Materials*. 2020. Volume 864. P. 3–8.
13. Киреев В. А. Курс физической химии. Москва: Химия, 1975. 776 с.

Галагура Євгеній Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301070.
E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3075-8651.

Беліченко Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: (057)7073726. E-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0002-7444-8188.

Павлюченко Михайло Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського Державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301071.

E-mail: pavliuchenkov@ukr.net. ORCID: 0000-0003-0542-7284.

Кравців Лариса Богданівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301070.

E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net. ORCID: 0000-0003-4632-6148.

Биченок Ігор Володимирович, аспірант кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301071. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-6249-0303.

Galagurya Evgeniy, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3075-8651.

Belichenko Olena, PhD (Tech). Senior Researcher, department of technologies of road-building materials and chemistry, Kharkiv national automobile and highway university. (057)7073726. E-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0002-7444-8188.

Pavliuchenkov Mykhailo, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: pavliuchenkov@ukr.net.

ORCID: 0000-0003-0542-7284.

Kravtsiv Larysa, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.

ORCID: 0000-0003-4632-6148.

Buchenok Ihor, postgraduate student, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301071. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6249-0303.

Статтю прийнято 10.11.2021 р.