

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ
КЛАСУ C50/60 З УРАХУВАННЯМ НИЗХІДНОЇ ВІТКИ
ДЕФОРМУВАННЯ**

**RESEARCH OF DEFORMATIVE PROPERTIES OF CONCRETE CLASS
C50/60 TAKING INTO ACCOUNT THE DESCENDING BRANCH OF
DEFORMATION**

Марек Дохойда, ORCID.ORG/0000-0003-0382-805X (Варшавський університет природничих наук), **Бабич Є.М. д.т.н., проф.**, ORCID ID: 0000-0003-1746-9991, **Філіпчук С.В. к.т.н., доц.**, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Савицький В.В. к.т.н., доц.**, ORCID ID 0000-0001-8807-9486 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marek Dohojda, (Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego), **Babych Y. Dr, Prof.**, **Filipchuk S.V. candidate of technical sciences, associate professor**, **Savitskiy V.V., doctor PhD, preprofessor**, (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

Виконаний експеримент по дослідженню деформування бетону одночасно на двох різних пресах з жорстким режимом навантаження та шляхом приросту навантаження. Здійснений аналіз деформування бетонних призм на цих пресах. Побудована повна діаграма деформування бетону з урахуванням низхідної ділянки деформування бетону. Здійснено порівняння отриманих даних з нормативними, що підтверджує адекватність отриманих даних.

Hundreds of experimental works have been known to determine the compressive strength limit, but they were all executed with incremental load increments. Our own experiment claims to be a novelty approach, namely, the use of a 'hard' machine and load by means of a stepwise increase in the displacement of a press plate. This method of loading provides much less information for analyzing the process of working concrete in compression. There is no descending branch in the 'load-displacement' diagram, and the sample itself collapses instantaneously at the maximum point of displacement. The maximum stress obtained by increasing the load is almost the same as the one obtained in the hard loading mode. In addition, on samples that were tested in National University of Water and Environmental Engineering laboratory. Additional indicators were installed to determine the movements between the press plates. Thus, the movements determined were similar to those identified in the INSTRON 8806 press. It is clear that it is extremely

difficult to determine the true deformation of the sample due to the friction on the edges of the sample. Deformation is essentially overestimated. According to the most approximate estimates the displacement spent on clutter is about 60% of the total reduction in the distance between the press plates. Almost all of the first plot in the diagram consists of deformations of the friction on the edges of the sample. However, we will try to determine the real diagram of deformation of concrete, taking into account the diagram obtained on the press PG-250. The deformation of the concrete in the prisms tested in the INSTRON 8806 press was by dividing the movements found between the press plates on the distance between the plates of the press. Since, as was noted above, the true deformation of the sample due to the stiffening at the edges of the sample differs from those obtained in this way. To correlate these deformations, use the true deformation diagram found in the PG-250 press. This can be done taking into account the identity of the results obtained on both presses. Comparison of the received data with the normative which confirms the adequacy of the data was conducted.

Ключові слова:

Міцність, арматура, високоміцний важкий бетон, розрахунок
Strength, armature, high-hard concrete, calculation

Вступ. За останні роки, завдяки, впровадженню комп'ютерної техніки в процеси розрахунку і проведення експериментів, істотно розширилися можливості дослідників в пізнанні різних, точних процесів, у тому числі і характеру роботи бетону на низхідній вітці деформування. Сучасні методи вимірів дозволяють фіксувати, наприклад, деформації, з точністю до 0,0001 мм, що дозволяє глибше проникнути в суть явища руйнування. Широке поширення отримали так звані "жорсткі" випробувальні машини, в яких зміна навантаження йде за зміною деформацій, на відміну від традиційного експерименту, коли навантаження збільшується постійно аж до руйнівної величини. Подібні машини дозволили уперше отримати точний вид кривої "напруження - деформації" і побудувати низхідну ділянку вітки (ділянка діаграми, що йде за точкою максимального навантаження).

Відомі численні експериментальні роботи для визначення межі міцності на стиск, але усі вони були виконані з покроковим приростом навантаження. Наш же експеримент претендує на новизну підходом, а саме використанням "жорсткої" машини і навантаження за допомогою покрокового приросту переміщень плити пресу.

При проведенні випробувань величини навантаження і деформацій передавалися з пресу на комп'ютер. У табличному виді зафіксовані наступні параметри:

- порядковий номер зразка;
- час навантаження;
- величина навантаження для кожного приросту переміщення пресу;

- напруження для кожного приросту переміщення пресу;
- переміщення пресу;
- швидкість навантаження.

В процесі експерименту швидкість навантаження приймалася досить низькою з метою виключення динамічних ефектів (1,5 мм/хв.), і нами не ставилося в якості одного із завдань визначити вплив швидкості навантаження на міцнісні характеристики зразків. Проте, слід зауважити, що зміна швидкості навантаження в діапазоні від 1 до 3 мм/хв., не здійснює істотного впливу на міцність [1, 2, 3].

Об'єм та методика експериментальних досліджень. Перша частина досліджень виконувалася у Варшавському університеті природничих наук (SGGW, Warszawa, Polska). Випробування проводились в універсальній машині INSTRON 8806 (рис.1). Вона складається з чотирьохколонних гідравлічних машин для статичних та динамічних випробувань із здатністю навантаження до 25000 кН. Ці високопотужні машини оснащені високожорсткими рамами, що забезпечують точне вирівнювання, і гідравлічними пристроями для підйому і блокування, а також приводом на верхній траверсі.

Точні механічні системи разом з поліпшеними функціями цифрового контроллера і датчиків навантаження дозволяють INSTRON представляти повністю інтегровані готові рішення для трудомістких завдань. На цих системах можна проводити широкий ряд статичних і динамічних випробувань на механіку руйнування матеріалів та арматурних стержнів. Що стосується комп'ютерного інтерфейсу, програмне забезпечення забезпечує повний контроль над системою, включаючи створення форм сигналів, калібрування, установку обмежень і відстежування статусу.

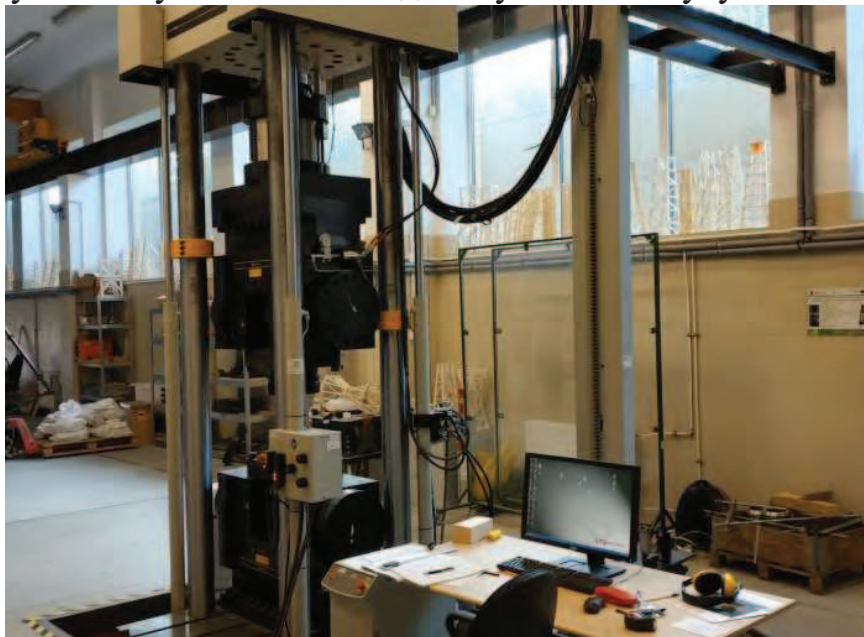


Рис. 1. Загальний вигляд випробувальної машини INSTRON 8806

Дослідженням піддавався бетон отриманий в лабораторіях кафедр технології будівельних виробів і матеріалознавства та промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП [4, 5]. Для досягнення поставленої мети й реалізації задач були забетоновані 3 призми розмірами $10 \times 10 \times 40$ см та 3 куби розмірами $10 \times 10 \times 10$ см із бетону класу С50, що дало змогу визначити міцнісні і деформативні характеристики бетону. Випробування зразків кожної серії проводили у віці бетону 28 діб.

Друга частина досліджень проводилася в Національному університеті водного господарства та природокористування. Тут було випробувано 3 призми розмірами $10 \times 10 \times 40$ см та 3 куби розмірами $10 \times 10 \times 10$ см із того ж бетону класу С50. Треба відмітити, що всі призми та куби бетонувалися одночасно, а потім випробовувалися в різних місцях.

Механічні характеристики бетону (кубова і призмове міцності) при одноразовому короткочасному навантаженні визначались за стандартними методиками [6]. Випробування призм на стиск виконували в гідравлічному пресі ПГ- 250 (з ціною поділки 2,5 кН). Їх навантаження здійснювали ступенями, величина яких приймалася рівною 8...10% від очікуваного руйнівного зусилля. На кожному ступені навантаження робилися витримки протягом п'яти хвилин, для зняття відліків та стабілізації деформацій. Перед основними випробуваннями призм виконували їх центрування по фізичній осі.

Результати випробування. В першій частині дослідів при випробуванні бетонних кубиків та призм на стиск у віці 28 діб для бетону класу С50/60 були отримані наступні результати: $f_{cm, cube} = 65,1$ МПа та $f_{cm, prism} = 42,7$ МПа.

Завдяки жорсткій формі навантаження вдалося спостерігати і зафіксувати повний характер роботи бетону при стиску [7, 8, 9]. Повна діаграма представлена на рис.2.

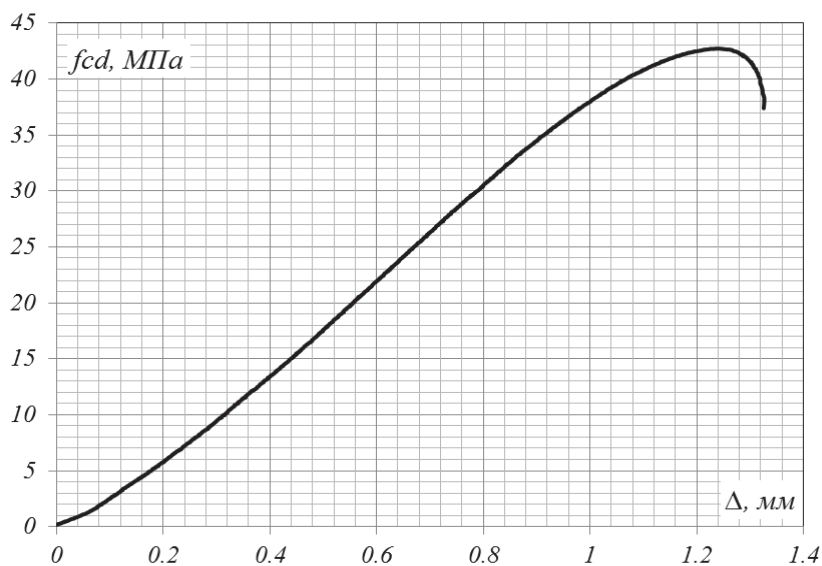


Рис. 2. Діаграма механічного стану при випробуванні за жорстким режимом роботи

На діаграмі можна виділити три різні ділянки. На першій ділянці відбувається зім'яття під плитами пресу, коли зростання деформацій істотно випереджає зростання зусилля, що прикладається. Приблизно на відмітці 5 МПа починається зміцнення матеріалу, завершення процесу місцевого зім'яття і вирівнювання залежності "навантаження-переміщення" до прямої лінії. Більшу частину досліду матеріал працює за законом Гука і поводить себе пружно. При навантаженні біля 40 МПа крива поступово відхиляється від лінійної залежності між зусиллям і деформаціями (друга ділянка на діаграмі). Далі кут нахилу дотичної до кривої з віссю "переміщення пресу" поступово збільшується, доходючи у вершині графіку до 90°, що добре видно для даного класу бетону на рис. 2.

Відразу за максимумом напруження починається ділянка низхідної гілки "навантаження - переміщення пресу". Навантаження зменшується, і можна помітити, що ділянка низхідної гілки не є дуже довгою.

В якості перевірки коректності отриманих даних, окрім жорсткого режиму вантаження, на таких же зразках зусилля подавалося традиційним способом - шляхом приросту навантаження. Цей спосіб вантаження дає значно менше інформації для аналізу процесу роботи бетону при стиску. Повністю відсутня низхідна гілка на діаграмі "навантаження - переміщення", а сам зразок руйнується миттєво в максимальній точці переміщень (рис.3).

Максимальне напруження, отримане шляхом приросту навантаження, майже не відрізняється від аналогічного, отриманого при жорсткому режимі навантаження. При жорсткому режимі $f_{cm, prism} = 42,7$ МПа, а при звичайному - $f_{cm, prism} = 45,0$ МПа.

Крім того, на зразках, що випробовувалися в лабораторії НУВГП були встановлені додаткові індикатори для визначення переміщень між плитами пресу. Так, визначалися переміщення аналогічні тим, що були визначені в пресі INSTRON 8806.

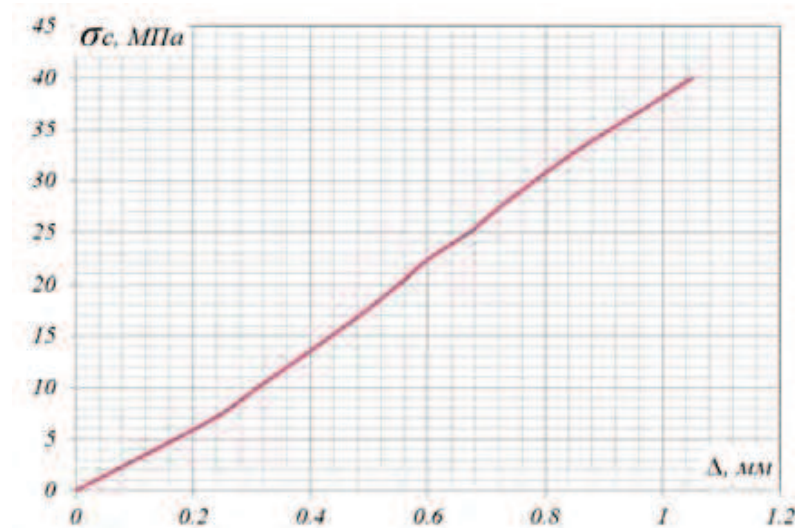


Рис. 3. Діаграма механічного стану при поступовому збільшенні навантаження ступенями

Якщо подивитися на рис. 4., то можна побачити, що переміщення в обох пресах майже співпадають. Це дає нам змогу говорити про однорідність бетону та адекватність і тотожність отриманих даних на двох різних пресах, з різними режимами роботи. Також ідентичним є характер руйнування призм (рис. 5.)

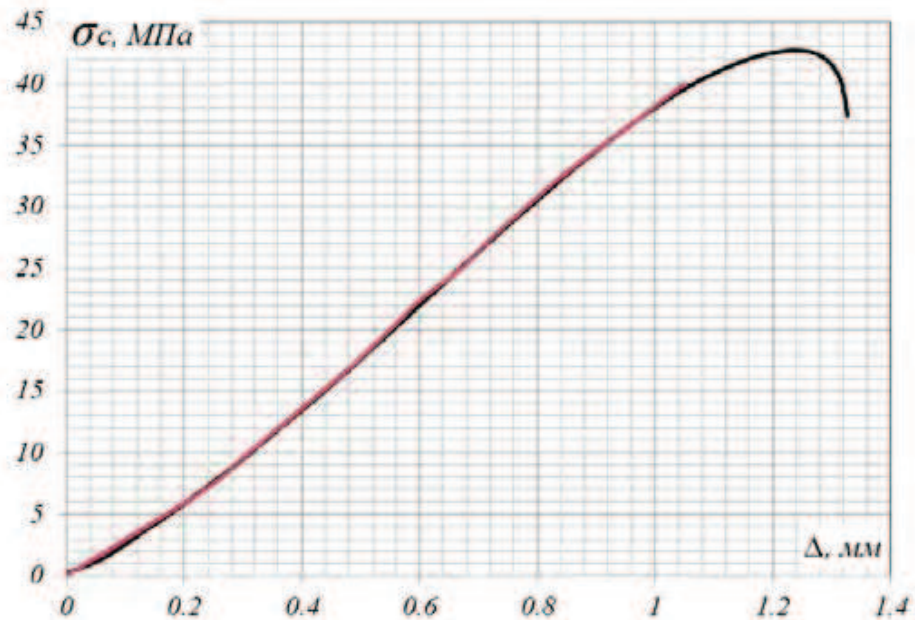


Рис. 4. Переміщення в пресах 1) INSTRON 8806 ; 2) ПГ- 250.



а)



б)

Рис. 5. Характер руйнування призм а) прес INSTRON 8806 ; б) прес ПГ- 250.

Зрозуміло, що украй скрутно визначити істинні деформації зразка через зім'яття на краях зразка, внаслідок чого деформація виявляється істотно

завищеною величиною. За найнаближенішими оцінками переміщення витрачене на зім'яття складає близько 60% загального скорочення відстані між плитами пресу. Практично уся перша ділянка на діаграмі складається з деформацій зім'яття на краях зразка. Проте, спробуємо визначити реальну діаграму деформування бетону з урахуванням діаграми, отриманої на пресі ПГ- 250.

Деформації бетону в призмах, що випробовувалися в пресі ПГ- 250 за звичайного режиму навантаження визначалися за стандартними методиками. На базі 200 мм в призмі розташовували чотири індикатори годинникового типу 1МИГ. На кожному ступені завантаження, після витримки, були зняті покази з приладів і занесені в журнал випробувань. Після обробки даних була побудована залежність "напруження – деформація". Зрозуміло, що дана крива не мала низхідної вітки деформування бетону, а закінчувалася в максимальній точці навантаження бетону.

Деформації бетону в призмах, що випробовувалися в пресі INSTRON 8806, знаходилися шляхом ділення знайдених переміщень між плитами пресу на відстань між плитами пресу. Так як, було зазначено вище, істинні деформації зразка через зім'яття на краях відрізняються від отриманих таким шляхом.

Для кореляції цих деформацій використаємо істинну діаграму деформування, отриману в пресі ПГ- 250. Це можна робити з урахуванням ідентичності отриманих результатів на обох пресах.

Параметри діаграми деформування бетону при одноразовому короткочасному навантаженні до руйнування можна визначати таким чином: призмova міцність f_{cd} – на підставі визначеного середнього руйнівного навантаження за трьома призмами; E_{cm} , E_{cm0} , ε_c і λ – визначались, використовуючи формулу

$$E_{cm} = E_{cm0}(1 - \lambda \eta), \quad (1)$$

яка отримувалась на основі статистичної обробки експериментальних даних. Значення E_{cm0} визначали за формулою (1) при $\eta = 0$, E_{cmu} – при $\eta = 1,0$, λ – як відношення $(E_{cm0} - E_{cmu}) / E_{cm0}$, $\varepsilon_c = f_{cd} / E_{cmu}$.

Враховуючи численні дослідження деформативності бетону, можна прийти до висновку, що дана формула працює при рівнях навантажень $\eta = 0,2 \dots 0,8$. Після рівня навантаження $\eta = 0,8$ січний модуль деформації бетону буде мати криволінійний характер. Побудуємо січні лінії до кривих повних деформацій у відповідних точках для обох режимів навантаження. Для кореляції введемо коефіцієнти K_i .

$$K_i = \frac{E_{cm,i}^{8806}}{E_{cm,i}^{250}} \quad (2)$$

де $E_{cm,i}^{8806}$ - модуль деформації бетону визначений в на i -му рівні навантаження в пресі INSTRON 8806;

$E_{cm,i}^{250}$ - модуль деформації бетону визначений в на i -му рівні навантаження в пресі ПГ- 250.

Вважаємо, що при рівні навантаження $\eta = 0,8$ відбулося повне ущільнення країв призми, і надалі ці деформації не будуть наростати. Для побудови низхідної вітки віднімаємо в решти точках випробувань деформації визначені в пресі INSTRON 8806 від деформацій ущільнення. Отримаємо діаграму зображену на рис. 6.

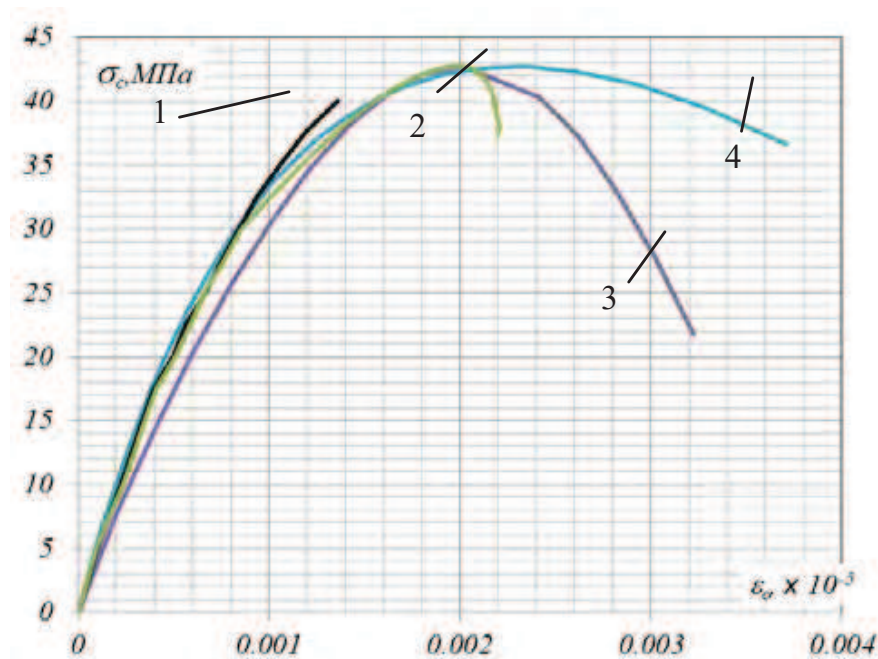


Рис. 6. Діаграма деформування бетону: 1 – призма випробувана в пресі ПГ- 250;
2 – призма випробувана в пресі INSTRON 8806;
3 – за ДБН 2.6-98-2009; 3 – за *Eurocod-2*.

Як видно отриманий графік досить добре збігається з графіком деформування бетону визначеними за ДБН 2.6-98-2009 та трохи гірше з графіком визначеним за функцією *Eurocod-2*. Згідно ДБН 2.6-98-2009 значення деформації мали складати $\varepsilon_{cl} = 202 \times 10^{-5}$ та $\varepsilon_{cu} = 240 \times 10^{-5}$. В графіку 1 вони ж склали $\varepsilon_{cl} = 199 \times 10^{-5}$ та $\varepsilon_{cu} = 220 \times 10^{-5}$. Тобто, значення відносних граничних деформацій стиску бетону в експерименті виявилось дещо меншим від норм проектування. Адекватність побудованого рівняння можемо також перевірити, використавши норми проектування Республіки Білорусь СНБ 5.03.01-02. Згідно цих норм закритичну область роботи бетону на низхідній вітці діаграми деформування при розрахунку необхідно обмежувати рівнем напруження $\sigma_{cu} = k_u f_{ck}$. Коефіцієнт k_u для високоміцних бетонів приймається 0,9. Тобто, при граничних деформацій стиску бетону

$\varepsilon_{cu}=220 \times 10^{-5}$ значення деформацій ε_{cl} мали б складати $\varepsilon_{cl}=220 \times 10^{-5} \times 0,9=198 \times 10^{-5}$, що в повній мірі відповідає побудованому графіку.

Висновок. 1. Вперше, був виконаний експеримент по дослідженню деформування бетону одночасно на двох різних пресах з жорстким режимом навантаження та шляхом приросту навантаження. Здійснений аналіз деформування бетонних призм на цих пресах.

2. Побудована повна діаграма деформування бетону з урахуванням низхідної ділянки деформування бетону.

3. Здійснено порівняння отриманих даних з нормативними, що підтверджує адекватність отриманих даних.

1. О. Я. Берг Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М: Госстройиздат, 1961. – 96 с.

O.I. Berh Fyzycheskye osnovy teoryy prochnosty betona y zhelezobetona. – М.: Hosstroiyzdat, 1961. – 96 s.

2. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.:Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

DBN V.2.6-98-2009 Betonni ta zalizobetonna konstruktsii. K.: Minbud Ukrainy, 2009. – 71 s.

3. EN 1992-1-1: Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings draft. December, 2004. (in English).

4. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // – К: Основа, 2007. – 616 с.

L. Y. Dvorkyn, O.L. Dvorkyn Osnovy betonovedeniya. - М.: Stroibeton, 2006. - 689 s.

5. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Філіпчук С.В., Кочкар'ов Д.В., Ковалик І.В., Ковальчук Т.В., Скрипник М.М. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібро бетони – Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.

Dvorkin L.J., Babich E.M., ZHitkovs'kij V.V., Bordyuzhenko O.M., Filipchuk S.V., Kochkar'ov D.V., ta in. Visokomicni shvidkotverdnuchi betoni ta fibro betoni – Rivne: NUVGP, 2017. 331 s.

6. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1980. – 14 с. Betonny. Metody opredeleniya pryzmennoi prochnosty. GOST 24452 - 80.

7. Babych, Y., Filipchuk, S., Fenko, O., "Mathematical modeling of the resistance of pulling out steel bars from high strength concrete," International Journal of Engineering and Technology (UAE), vol. 7 (3.2), pp. 516-521, May 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14581>

8. Yevhenij Babich, Sergij Filipchuk, Victor Karavan, Justyna Sobczak-Piastka. Research of basic mechanical and deformative properties of high-strength fast-hardening concretes. AIP Conference Proceedings 2077, 020003 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091864>

9. Yevhenij Babich, Sergij Filipchuk, Victor Karavan, Justyna Sobczak-Piastka. General requirements for materials of fortification protective structures. AIP Conference Proceedings 2077, 020004 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091865>