

УДК 691.327.014.13

ВПЛИВ ВЛАСНИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ПРИ СТИСКУ В ЧАСІ

Кандидати техн. наук О. Г. Фенко, П. Б. Митрофанов, О. А. Крупченко, П. А. Юрко,  
студент Д. О. Фенко

THE IMPACT OF ITS OWN STRESSES ON CONCRETE STRENGTH  
BY COMPRESSION UNDER THE INFLUENCE OF TIME

PhD (Tech.) O. Fenko, PhD (Tech.) P. Mytrofanov, PhD (Tech.) O. Krupchenko,  
PhD (Tech.) P. Yurko, student D. Fenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-852.204.2023.283873>



**Анотація.** Усадка бетону повітряно-сухого висихання починається з зовнішніх шарів, саме так внутрішні шари стиснуті, а зовнішні розтягнені. Такий напружений стан сприяє підвищенню міцності зразка на стиск. З часом проявляється повзучість, що скорочує внутрішні шари і збільшує зовнішні. Внутрішні шари, скорочуючись від усадки, стискають зовнішні шари. При навантаженні такого зразка стискальною силою перевантажені будуть зовнішні шари, що призведе до зниження міцності зразка. З часом усадка загасає, проявляється релаксація власних напружень, зменшується їхній негативний вплив на міцність бетону, тому міцність зростає. При водонасиченні бетонних зразків проявляється зворотний ефект.

**Ключові слова:** власні напруження, міцність бетону, повзучість, усадка, релаксація, водонасичення.

**Abstract.** Shrinkage of concrete air-dry drying begins with the outer layers, thus the interior layers are compressed and the outer layers are stretched. This own stressed state contributes to the strength the sample compression. This increase in strength is quite difficult to detect because it form increase with the strength of cement stone.

In the described own stressed state creep of concrete in the outer layers with stretch appears with time, and the interior layers do in compression, which results of the size of the interior layers in decrease and of the size of the outer layers to increase. The interior layers, decreasing from shrinkage, compress the outer layers. In this sample loading compressive force will overload the outer layers, which will decrease the strength of the specimen.

With time shrinkage disappear and manifested relaxation own stress consequently decreases their negative influence on the strength of concrete, and so increases strength.

With water-saturation of concrete sample the opposite effect will appear. Water- saturation process begins with the surface sample. While swelling (when expanding) causes the appearance of compressive own stressed in the outer layers and stretch in the interior layers. When tested in compression of the sample the outer layers will be overloaded and the strength of concrete will decrease.

This stressed state causes the creep in compressed outer layers and creep in the stretched interior layers that leads to partial relaxation of own tensions. Decreasing of own stress reduces their negative impact and the strength of concrete is increased after a temporary reduction. With time the

*creep concrete (compressed in the core and stretched to the surface of sample) and relaxation of own stress diminishes their impact, which reduces the strength of concrete.*

*Described the impact of own stress on strength applies to other porous materials. Such conclusions are confirmed by many experiments in which the authors explain this phenomenon by adsorption effect and capillary compression.*

*It should also be noted that the physical mechanics of the impact of own stress on concrete strength is not substantiated.*

**Keywords:** *own stresses, strength of concrete, creep, shrinkage, relaxation, water-saturation.*

**Вступ.** Міцність бетону змінюється в часі, а також залежить від умов зберігання, зволоження, висушування та власних напружень, викликаних усадкою, набряканням, повзучістю при тривалих навантаженнях.

Вплив структурних власних напружень на міцність бетону, викликаних тривалими стиском або розтягом, досліджувався в багатьох експериментах. Вплив нерівномірно розподілених по поперечному перерізу власних напружень на міцність бетону не досліджувався, хоча його доцільно вважати одним із факторів, що визначає міцність бетону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міцність бетону залежить від багатьох факторів, до яких у першу чергу належать склад бетону та умови його твердіння [1, 2], вік бетону [3], температура та вологість навколишнього середовища [4-7, 11-15], тому виділити окремо вплив власних напружень на міцність бетону досить складно. Щоб виявити вплив власних напружень, розподілених нерівномірно по поперечному перерізу, на міцність матеріалу, логічно було провести дослід на нестаріючому і непористому матеріалі. Таким матеріалом можна вважати метал [8].

Загальновідома послідовність руйнування металевих (крихких) зразків: при стиску руйнування зразків починається з зовнішніх шарів, а при розтязі – з внутрішніх. Таку послідовність руйнування можна пояснити впливом власних напружень, що з'являються при відливанні (прокатуванні) металу. Під час твердіння металевих зразків при їхньому відливанні охолодження починається з зовнішніх

шарів, отже температура зовнішніх шарів менша, ніж внутрішніх. При вирівнюванні температури зовнішні шари будуть стиснені, а внутрішні розтягнені. При випробуванні таких зразків на стиск власні напруження в зовнішніх шарах і напруження від зовнішнього навантаження (одного знака) будуть складатися, і руйнування зразка розпочнеться з зовнішніх шарів. При випробуваннях на розтяг перевантажені будуть внутрішні шари, і руйнування почнеться зсередини зразка.

Для підтвердження наведених висновків доцільно виготовити і випробувати зразки з протилежним за знаками полем власних напружень порівняно з полем напружень, що виникає при «природному» охолодженні, тобто щоб зовнішні шари були розтягнені, а внутрішні стиснуті.

Такі досліді були проведені на зразках із крихкого (силікатного) дюралюмінію. Зразки діаметром 30 мм і висотою 60 мм в кожній партії відливалися з однієї плавки. Зразки «природного» виготовлення відливалися в сталеві циліндри й охолоджувались із зовнішніх шарів.

Інші зразки розливалися у такі самі циліндричні сталеві форми зі встановленими по центру сталевими трубками. Форми були встановлені в електронагрівальні пристрої. Перед розливом дюралюмінію форми нагрівались до температури плавлення дюралюмінію і по трубці пропускалась вода кімнатної температури. Отже, охолодження зразка при його твердінні відбувалося з внутрішніх шарів, що створювало поле власних

напружень, протилежне за знаком попередньому.

Результати випробувань підтвердили попередні висновки про вплив власних напружень на міцність дюралюмінію: зразки з протилежним «природному» полем власних напружень виявились міцнішими від зразків «природного» виготовлення в середньому на 20 % [8], тобто вплив власних напружень, нерівномірно розподілених по поперечному перерізу, у середньому складає 10 %.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Недослідженим залишився вплив власних напружень на міцність при стиску бетону, а також інших пористих матеріалів. Метою проведених дослідів є визначення впливу нерівномірно розподілених по перерізу власних напружень на міцність бетону при стиску.

**Основна частина дослідження.** Складність дослідів із впливу власних напружень, викликаних усадкою, на міцність бетону полягає в тому, що інтенсивність і розподіл усадки по перерізу залежить від умов зберігання бетонних зразків.

При зберіганні зразків у повітряно-сухому середовищі усадка починається та інтенсивніше протікає на поверхні зразка і поступово проходить до внутрішніх шарів. При скороченні (за рахунок усадки) розмірів зразка на його поверхні виникають усадкові розтягувальні напруження, що стискуватимуть бетон у ядрі (центрі) зразка, і створюють умови до появи тріщин на поверхні зразка.

На початку навантаження такого зразка стискальною силою зовнішні шари стиснуті не будуть до величини навантаження, здатного компенсувати в них власні розтягувальні напруження.

Внутрішня частина зразка, стиснута власними напруженнями до прикладення зовнішньої сили, при навантаженні стискальною силою буде мати більші (сумарні) напруження, ніж зовнішні шари, і

тому має визначати міцність всього зразка. Однак внутрішня частина, хоч і перевантажена, але знаходиться в обіймі, створеній недовантаженими зовнішніми шарами. У результаті такий зразок у цілому має витримати більше зовнішнє навантаження, ніж зразок, без власних напружень. Загальновідомим є й ефект збільшення міцності при висушуванні бетону (він підтверджується численними експериментами). Продовжуючи аналіз впливу усадкових (нерівномірно розподілених по перерізу) напружень, можна прогнозувати можливе зниження міцності бетону в часі.

У згаданому вище напруженому стані виникає повзучість бетону в зовнішніх шарах від розтягу, а у внутрішніх від стиску. Паралельно з цим усадка просувається до внутрішніх шарів і в решті-решт досягає центральної частини зразка. У цей період інтенсивність усадки в зовнішніх шарах знизилася, бетон збільшився в розмірах за рахунок повзучості від розтягу власними напруженнями.

Внутрішні шари (ядро зразка), скорочуючись від усадки в розмірах, стискають зовнішні шари, перебуваючи самі в розтягнутому стані. Характерно те, що цей процес підсилюється отриманим скороченням внутрішньої частини за рахунок повзучості при стиску в початковий період усадки.

При навантаженні такого зразка стискальною силою перевантаженими будуть зовнішні шари, що знаходяться без обійми, і зразок зруйнується при меншому навантаженні, ніж зразок без власних напружень. На основі викладеного можна зробити висновок про можливе зниження міцності бетону в часі. Цей висновок підтверджується дослідями (рис. 1). У дослідях С. А. Миронова в усіх бетонах (і природного твердіння, і в пропарюваних) спостерігається тимчасове зменшення міцності бетону [1].

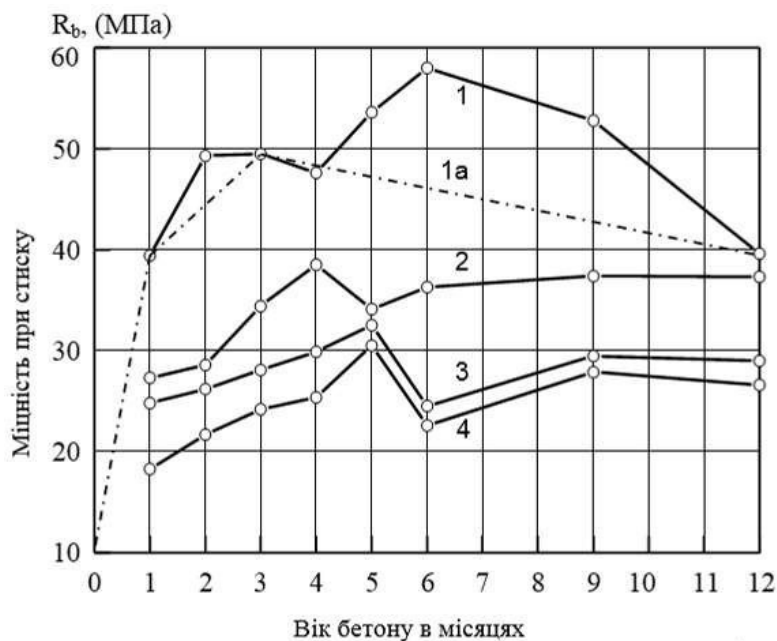


Рис. 1. Зміна в часі міцності бетону в досліджах С. А. Миронова

Через деякий час усадка бетону загасає, проявляється релаксація власних розтягувальних напружень усередині (ядри) зразка і стискальних напружень у зовнішніх шарах, тобто зменшуються різниця (перепад) напружень у зовнішніх і внутрішніх шарах і, як наслідок, їхній негативний вплив на міцність бетону при стиску. Відбувається своєрідне «відновлення» (зростання) міцності бетону.

На рис. 1 показані діаграми зміни кубикової міцності при стиску бетону деяких зразків. Повторне зниження міцності бетону може бути додатково викликане релаксацією структурних власних напружень [3]. Такого зниження може й не бути залежно від властивості бетону (розмірів щебеню, водоцементного відношення, умов твердіння та ін.), а також умов зберігання.

Узагальнюючи аналіз впливу усадкових напружень (нерівномірно розподілених по поперечному перерізу) на міцність бетону при стиску, можна зробити висновок, що міцність бетону спочатку має збільшуватися, потім може наступити тимчасове зменшення міцності, після чого знову настає збільшення міцності при

стиску. Ці висновки повністю підтверджуються дослідями С. А. Миронова та інших.

Діаграми могли мати й інший вигляд залежно від методики проведення дослідів. Наприклад, якщо побудувати діаграми за трьома точками, то повторного підвищення міцності бетону не буде (рис. 1, крива 1a). Такі результати були отримані в досліджах авторів роботи [2], у яких міцність бетону визначалася в чотирьох термінах (рис. 2, рис. 1, крива 1a), а не восьми, як у досліджах С. А. Миронова.

При водонасиченні бетонних зразків буде проявлятися протилежний ефект. Процес зволоження починається з зовнішніх шарів. Бетон набрякає (збільшується в розмірах), викликає стискальні власні напруження в зовнішніх шарах і розтягувальні у внутрішніх (центральных). При стиску такого зразка перевантаженими будуть зовнішні шари, але вони не знаходяться в об'ємі (як внутрішні), і зразок почне руйнуватися з зовнішніх шарів, як наслідок, міцність зразка виявиться меншою, ніж міцність такого самого зразка без власних напружень, викликаних набряканням.

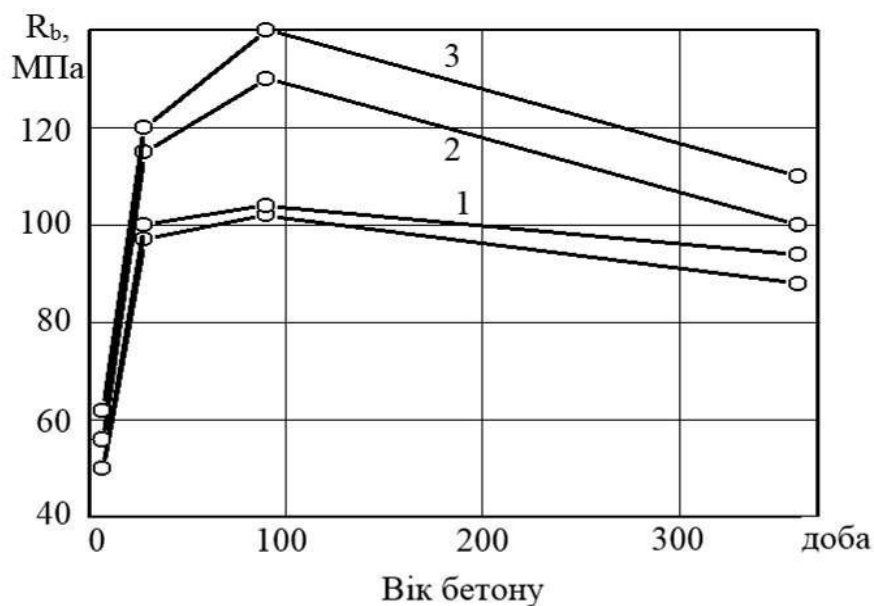


Рис. 2. Зміна міцності бетону (1), розчину (2) і цементного каменю (3) у часі в дослідях В. І. Ситника, Ю. А. Іванова

При такому напруженому стані проявляється повзучість стиснутого бетону в зовнішніх шарах і розтягнутого у внутрішній частині зразка, що призводить до часткової релаксації власних напружень. Зниження власних напружень зменшує їхній негативний вплив, і міцність бетону після тимчасового спаду підвищується.

Подальший процес набрякання центральної (внутрішньої) частини зразка створює поле власних напружень, протилежне описаному раніше. Поява такого поля власних напружень обумовлена тим, що повзучість бетону на початку водонасичення призвела до скорочення розмірів стиснутого бетону в зовнішніх шарах і збільшення його розмірів у внутрішній частині зразка. Набрякання внутрішніх шарів зразка (яке настає пізніше від зовнішніх) продовжує збільшувати їхні розміри, розтягуючи при цьому скорочені в розмірах зовнішні шари. Це призводить до ще більшого підвищення міцності бетону.

Повзучість бетону (стиснутого в ядрі перерізу і розтягнутого в зовнішніх шарах) і релаксація власних напружень зменшує

їхній позитивний вплив, тому міцність бетону поступово буде зменшуватись. Залежно від технології виготовлення та умов зберігання зразків зниження міцності може проявлятися в дуже різні терміни. Наведений характер зміни міцності бетону на стиск при його водонасиченні підтверджується дослідями різних авторів [7, 9], проаналізованими З. М. Цілоسانی [6].

Викликає інтерес і те, що описаний вплив водонасичення на міцність при стиску стосується не лише бетонів, а й інших пористих матеріалів. На рис. 3 наведені результати дослідів Русселя [6]. Руссель дослідив вплив зволоження гіпсу на його міцність при стиску.

Як видно з рис. 3, послідовність зміни міцності гіпсу на стиск при водонасиченні повністю збігається з описаним обґрунтуванням впливу власних напружень. Такі ж результати одержані в дослідях Щукіна, Дукаревича та ін. [9], які досліджували зміни міцності гідроксиду магнію при насиченні його водою та етиловим спиртом (рис. 4).

З. М. Цілоسانی проаналізував причини впливу водонасичення на міцність пористих

матеріалів з використанням результатів експериментів різних дослідників [6]. Причини впливу зводились в основному до адсорбційного та капілярного обтиснення,

але такими факторами впливу води на міцність не вичерпуються всі можливі випадки її дії на бетон.

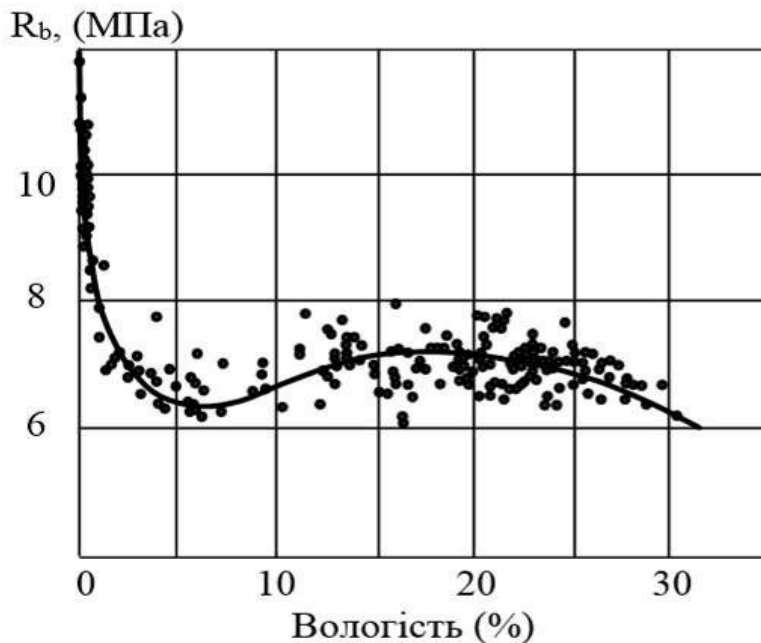


Рис. 3. Міцність гіпсових зразків при стиску залежно від вологості в дослідях Руссея [6]

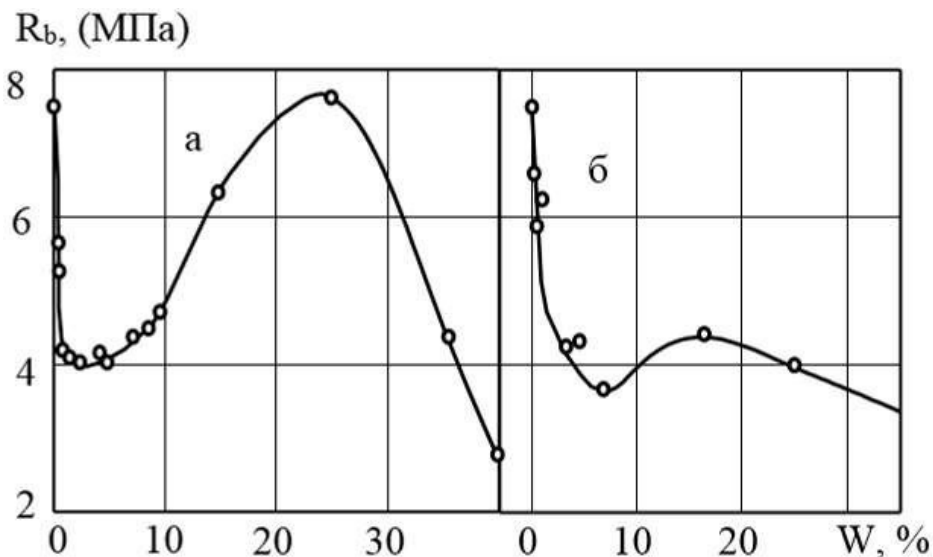


Рис. 4. Вплив насичення водою (а) та етиловим спиртом (б) гідроксиду магнію на його міцність при стиску

То ж не випадково в 60–70 роки ХХ століття в пресі з'явилися висновки деяких дослідників (В. В. Горохов, М. Т. Елбакідзе та ін.) про причетність власних напружень до впливу водонасичення і висушування на міцність бетону при стиску. Логічно також відзначити досліди С. В. Шестоперова та Т. Ю. Любимової [6], у яких досліджувався вплив водонасичення і висушування бетону на його міцність при стиску. Автори дослідів дійшли такого висновку: «зміни міцності при висушуванні та зволоженні зразків безмежно оборотні», що виключає вплив додаткової гідратації цементу.

Подібні результати були одержані в дослідях К. М. Мілейковської [10], яка досліджувала «вплив зволоження на міцність бетону повітряно-сухого твердіння». Вплив зволоження на міцність бетону К. М. Мілейковська пов'язує з

розвитком деформацій набрякання. Зазначається також, що з припиненням об'ємних деформацій набрякання, зниження міцності бетону припиняється, а при тривалому водонасиченні міцність повністю відновлюється.

**Висновки.** Відновлення міцності бетону при стиску відбувається після релаксації власних напружень (про що йшлося раніше). Слід також зазначити, що в дослідях різних авторів фізична механіка впливу власних напружень на міцність бетону не наводиться, і для остаточного вирішення цього питання необхідні як експериментальні, так і теоретичні додаткові дослідження.

Наведений аналіз власних напружень у бетоні, нерівномірно розподілених по перерізу (викликаних усадкою або набряканням), підтверджує та обґрунтовує їхній вплив на міцність бетону при стиску.

### Список використаних джерел

1. Расчет прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов, И. М. Френкель и др. Москва: Стройиздат, 1973. 94 с.
2. Сытник В. И., Иванов Ю. А. Экспериментальные исследования прочности и деформативности высокопрочных бетонов. *Высокопрочные бетоны* / НИИСК Госстроя СССР. Киев: Будівельник, 1967. 122 с.
3. Фенко Г. А., Фенко А. Г. Влияние структурных напряжений на изменение прочности бетона во времени. *Бетон и железобетон в Украине*. 2002. № 3. С. 2-6.
4. Liu B. D., Lv W. J., Li L., Li P. F. (2014). Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 69. P. 133-142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094>.
5. Semko O., Fenko O., Hasenko A., Harkava O. & Kyrychenko V. (2018). Influence of external and internal cooling at solidification on strength of brittle duralumin in compression. *MATEC Web of Conferences: 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings»*. 230: 02029.
6. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Мецниереба, 1979. 230 с.
7. Chen X., Huang W., Zhou J. Effect of moisture content on compressive and split tensile strength of concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2012. Vol. 19. P. 427–435.
8. Фенко О. Г., Фенко Г. О. Вплив власних напружень на міцність матеріалів. *Ресурсноекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць*. Рівне: НУВГП, 2013. Вип. 25. С. 466–471.
9. Zhang G., Li X. and Li Z. Experimental study on static mechanical properties and moisture contents of concrete under water environment. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, N. 10. P. 2962.

10. Милейковская К. М. Влияние водонасыщения бетона на его прочность и деформации. *Гидротехническое строительство*. 1960. № 4. С. 28–34.
11. Zhang X. & Li Z. (2015). Effects of shrinkage and creep on cracking in concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27(10). 04014219.
12. Zhang X. & Li Z. (2017). Time-dependent behavior of concrete and its modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 29(1). 04016227.
13. Zhang Y., Liu J. & Wang J. (2018). Experimental investigation of the effect of moisture content on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 155. P. 103-109.
14. Khan M. I. & Bouasker M. (2012). Effect of saturation on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 26(1). P. 413-418.
15. Chen Q., Wang D. & Li L. (2015). Experimental study on the mechanical behavior of concrete under different saturation conditions and high temperature. *Construction and Building Materials*. 81. P. 161-168.

---

Фенко Олексій Георгійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0002-3175-2892.

Тел.: +38 (097) 359-06-18. E-mail: fenko.aleksey@gmail.com.

Митрофанов Павло Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0003-4274-1336.

Тел.: +38 (050) 849-22-88. E-mail: mytrofanov.p@gmail.com.

Крупченко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID ID: 0000-0002-6075-5937. Тел.: +38 (095) 813-84-67.

Юрко Павло Анатолійович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID ID: 0000-0002-3485-435X. Тел.: +38 (066) 910-95-39.

Фенко Денис Олексійович, студент, група 101-МЕ, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Fenko Oleksiy, PhD (Tech). Associate Professor, department of building structures, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID ID: 0000-0002-3175-2892. Tel.: +38 (097) 359-06-18.

E-mail: fenko.aleksey@gmail.com.

Mytrofanov Pavlo, PhD (Tech). Associate Professor, department of building structures, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID ID: 0000-0003-4274-1336. Tel.: +38 (050) 849-22-88.

E-mail: mytrofanov.p@gmail.com.

Krupchenko Oleksandr, PhD (Tech). SE «State Research Institute for Building Constructions». ORCID ID: 0000-0002-6075-5937.

Yurko Pavel, PhD (Tech). SE «State Research Institute for Building Constructions». ORCID ID: 0000-0002-3485-435X.

Fenko Denys, student, Group 101-ME, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

Статтю прийнято 15.05.2023 р.