

УДК 624.012.3:620.179.16

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040719.58.464

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ У БЕТОНІ

КОЛОХОВ В. В.^{1*}, к. т. н., доц.,

КОЛОХОВ О. В.², студ.

^{1*} Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

² Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6353-4363

Анотація. Постановка проблеми. Визначення фізико-механічних характеристик бетону за допомогою ультразвукових коливань просте, але залежить від низки технологічних операцій та природних умов. Сучасні ультразвукові прилади використовують переважно так званий «сухий» контакт між поверхнею та приладом, що не завжди дозволяє отримати однозначні результати. **Мета дослідження** – оцінити вплив відмінностей структури бетону на час поширення ультразвуку в бетоні за зміни умов проведення вимірювань. **Методика.** Вимірювання проведено за допомогою приладу «Novotest ИПСМ-У». Під час випробувань використано зразки бетону з різним гранулометричним складом заповнювача. Зусилля притискання приладу до бетону зразка не перевищувало рекомендованого виробниками приладу. Статистична обробка отриманих результатів (з візуалізацією) виконана з використанням програмного комплексу EXEL. **Результати.** Для кожного зразка результати вимірювань перебувають у межах довірчого інтервалу із забезпеченістю 0,95. Визначено залежності «час поширення ультразвукових коливань – зусилля притискання приладу» та межі інтервалів із лінійними змінами. Спроби з'ясувати залежність змін меж встановлених інтервалів від змін у складі бетону зразків привели до значно нелінійних залежностей з низькою достовірністю апроксимації. Для дрібнозернистого бетону підтверджено вплив зусилля притискання приладу до бетону на результати вимірювань. Зразки з дрібнозернистого бетону продемонстрували більшу однорідність ніж зразки з важкого бетону. Більш висока однорідність, такого бетону порівняно зі звичайним важким бетоном все одно не дозволяє використовувати узагальнюючі залежності для визначення фізико-механічних характеристик бетону за результатами вимірювання часу поширення ультразвукових коливань за «сухого» контакту між приладом та бетоном. **Висновки.** Аналіз наведених результатів підтвердив необхідність удосконалення існуючої методики визначення фізико-механічних характеристик бетону за допомогою ультразвукових приладів. Підвищення точності методики можливо досягнути зменшенням впливу неоднорідності складу бетону, умов його виготовлення та експлуатації.

Ключові слова: фізико-механічні характеристики; неруйнівний контроль; ультразвук

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В БЕТОНЕ

КОЛОХОВ В. В.^{1*}, к. т. н., доц.,

КОЛОХОВ А. В.², студ.

^{1*} Кафедра технологий строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

² Кафедра технологий строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6353-4363

Аннотация. Постановка проблемы. Определение физико-механических характеристик бетона с помощью ультразвуковых колебаний одновременно с простотой дает большую неточность, которая зависит от ряда технологических операций и природных условий. Современные ультразвуковые приборы используют преимущественно так называемый «сухой» контакт между поверхностью и прибором, что не всегда позволяет получить однозначные результаты. **Цель исследования** – оценить влияние различий структуры бетона на время распространения ультразвука в бетоне при изменении условий проведения измерений. **Методика.** Измерения произведены с помощью прибора «Novotest ИПСМ-У». Во время испытаний использованы образцы бетона с различным гранулометрическим составом заполнителя. Усилие прижатия прибора к бетону образца не превышало рекомендованного производителями прибора. Статистическая обработка полученных результатов

(с визуализацией) выполнена с использованием программного комплекса EXEL. **Результаты.** Для каждого образца результаты измерений находятся в пределах доверительного интервала с обеспеченностью 0,95. Определены зависимости «время распространения ультразвуковых колебаний – усилие прижатия прибора» и границы интервалов с линейными изменениями. Попытки установить зависимость изменений границ установленных интервалов от изменений в составе бетона образцов привели к значительно нелинейным зависимостям с низкой достоверностью аппроксимации. Для мелкозернистого бетона подтверждено влияние усилия прижатия прибора к бетону на результаты измерений. Образцы из мелкозернистого бетона продемонстрировали большую однородность, чем образцы из тяжелого бетона, что все равно не позволяет использовать обобщенную зависимость для определения физико-механических характеристик бетона по результатам измерения времени распространения ультразвуковых колебаний при «сухом» контакте между прибором и бетоном. **Выводы.** Анализ приведенных результатов подтвердил необходимость совершенствования существующей методики определения физико-механических характеристик бетона с помощью ультразвуковых приборов. Повышения точности методики можно достичь путем уменьшения влияния неоднородности состава бетона, условий его изготовления и эксплуатации.

Ключевые слова: физико-механические характеристики; неразрушающий контроль; ультразвук

SOME ASPECTS OF MEASURING THE TIME OF PROPAGATION OF ULTRASONIC VIBRATIONS IN CONCRETE

KOLOKHOV V.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
KOLOKHOV O.V.², *Stud.*

^{1*} Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, phone: +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

² Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, phone: +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6353-4363

Abstract. Problem statement. Determination of the physico-mechanical characteristics of concrete with the use of ultrasonic vibrations simultaneously with simplicity has great uncertainty, which depends on a number of technological operations and environmental conditions. Modern ultrasonic devices use mainly the so-called “dry” contact between surface and device, which does not always allow to get unambiguous results. **Purpose.** To evaluate the effect of differences in the structure of concrete on the propagation time of ultrasound in concrete with changing measurement conditions. **Methods.** Measurements are made using the instrument "Novotest IPSM-U". During testing, samples of concrete with various aggregate granulometric composition were used. The pressing force of the device to the sample concrete did not exceed the device recommended by manufacturers. Statistical processing of the results obtained (with visualization) was performed using the EXEL software package. **Results.** For each sample, the measurement results are within the confidence interval with a security of 0.95. The dependences of the “propagation time of ultrasonic vibrations – the force of pressing the device” and the boundaries of intervals with linear changes are determined. Attempts to establish the dependence of changes in the boundaries of the established intervals on changes in the concrete composition of the samples led to significantly non-linear dependencies with low confidence of the approximation. For fine-grained concrete, the effect of pressing the device to concrete on the measurement results was confirmed. Samples of fine-grained concrete showed greater uniformity than samples of heavy concrete. That still does not allow the use of a generalized relationship to determine the physico-mechanical characteristics of concrete from the results of measuring the propagation time of ultrasonic vibrations during a “dry” contact between the device and concrete. **Conclusions.** The analysis of these results confirmed the need to improve the existing methodology for determining the physico-mechanical characteristics of concrete using ultrasonic devices. The improvement of the accuracy of the technique can be achieved by reducing the influence of heterogeneity of concrete composition, conditions of its manufacture and operation.

Keywords: physical-mechanical characteristics; non-destructive control; ultrasound

Постановка проблеми. Визначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) бетону за допомогою ультразвукових коливань (УЗК) набуло популярності завдяки достатній простоті методики застосування. Одночасно із простотою використання ультразвуковий метод має велику невизначеність [1; 2]. Ця

невизначеність зумовлена значною мірою неоднорідністю ФМХ бетону, яка, у свою чергу, залежить від низки технологічних операцій та природних умов [3]. Стандарти, що регламентують застосування цього методу [4; 5], пропонують використовувати різні прилади та тарувальні (градувальні)

залежності з їх коректуванням для кожного нового складу бетону.

Сучасні прилади вимірювання часу поширення УЗК (ЧПУЗК) використовують переважно так званий «сухий» контакт між поверхнею та приладом [4; 6]. Але, як показано у праці [7], умови застосування приладів, що рекомендовані їх виробниками [6], не завжди дозволяють отримати однозначні результати.

За для підвищення точності визначення ФМХ бетону необхідно врахувати вплив зусилля притискання приладу до поверхні, структуру та склад матеріалу, умови формування та тверднення бетону.

Мета дослідження – оцінити вплив відмінностей структури бетону на час поширення ультразвуку в бетоні за зміни умов проведення вимірювань.

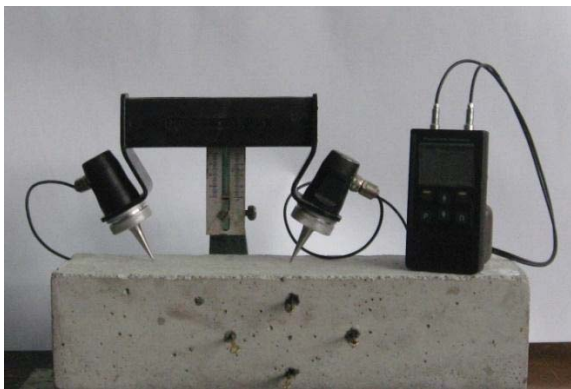


Рис. 1. Вимірювання часу поширення УЗК за допомогою вимірювача міцності будівельних матеріалів «Novotest ИПСМ-У» / Fig. 1. Measurement of the time of propagation of ultrasound with the help of a durability meter of building materials «Novotest ИПСМ-У»

Виклад матеріалу. Експерименти проведено зі зразками, виготовленими з дрібнозернистого бетону п'яти різних складів. Співвідношення між цементом та заповнювачем дорівнювало 1/3. Відмінності у складах досягнуто за рахунок зміни розмірів заповнювача. Для одного складу бетону як заповнювач використано дніпровський річковий пісок. Для решти чотирьох – часткові залишки на ситах 0,14; 0,315; 0,63 та 1,25 мм, які отримано під час просіювання цього піску крізь стандартний набір сит. Зразки виготовлено розміром 100 × 100 × 400 мм у металевій опалубці. Під час дослідження вимірювався час

поширення ультразвукових коливань (ЧПУЗК) на постійній базі, що зумовлено конструкцією приладів. Застосовано вимірювач міцності будівельних матеріалів «Novotest ИПСМ-У» (рис. 1). База вимірювання складала 120 мм.

Визначення проводилось на різних бічних поверхнях зразків, одна з яких контактувала з металевою опалубкою під час виготовлення та тверднення бетону, а інша – ні.

Інтервал зміни зусилля притискання приладу до зразка обрано від умовного нуля (вага лише самого приладу) до рекомендованого виробником рівня (10 кг). Шаг зміни складав 1,0 кг на всіх етапах, крім першого, для якого зусилля змінилось від власної ваги приладу до 1 кг.

На рисунках 2–6 показано результати визначення залежності «ЧПУЗК – зусилля притискання» для зразків бетону з різним гранулометричним складом заповнювача.

Як і в експериментах із важким бетоном [7], залежність поділяється на три інтервали: два «повільні» (на початку та наприкінці) та один «різкий» (між «повільними»).

Наведені залежності якісно більше схожі між собою, ніж аналогічні залежності для важкого бетону [7], але встановлення кількісних залежностей також ускладнене.

Для зразків із дрібнозернистого бетону підтверджено вплив умов тверднення (наявність або відсутність опалубки поруч із поверхнею бетону), але відсутня пряма залежність між контактом із поверхнею опалубки та ЧПУЗК. В окремих випадках зміна ЧПУЗК для другого «повільного» інтервалу (на відміну від важкого бетону) стає значно нелінійною. До того ж, для зразків дрібнозернистого бетону інтервал із різкими змінами ЧПУЗК складає від 10 до 20 % від усього інтервалу вимірювань.

Спроби з'ясувати залежність змін меж установлених інтервалів від змін у складі бетону зразків зумовили значні нелінійні залежності з низькою достовірністю апроксимації. Статистична обробка результатів виконана за допомогою засобів EXEL.

Обчислено: середнє значення ЧПУЗК на кожному етапі; максимальнє та мінімальнє значення; стандартнє відхилення; коефіцієнт

варіації, критерій Стюдента та межі довірчого інтервалу із забезпеченістю 0,95.

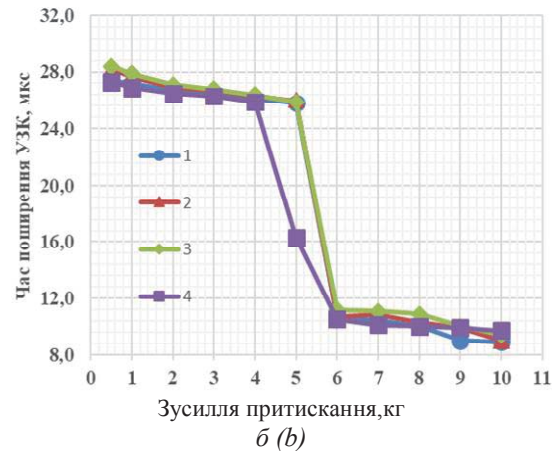
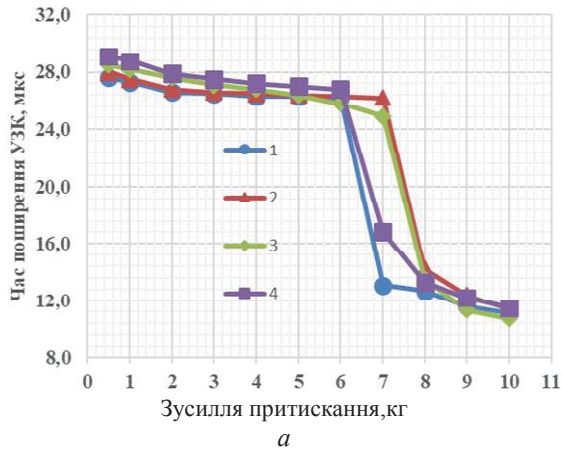


Рис. 2. Залежність «ЧПУЗК – зусилля притискання» (склад № 1) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 2. Dependence "time of ultrasound propagation – pressing forces" (composition No. 1) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

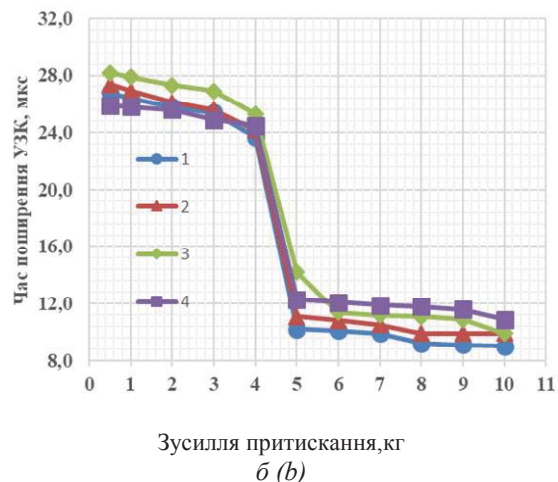
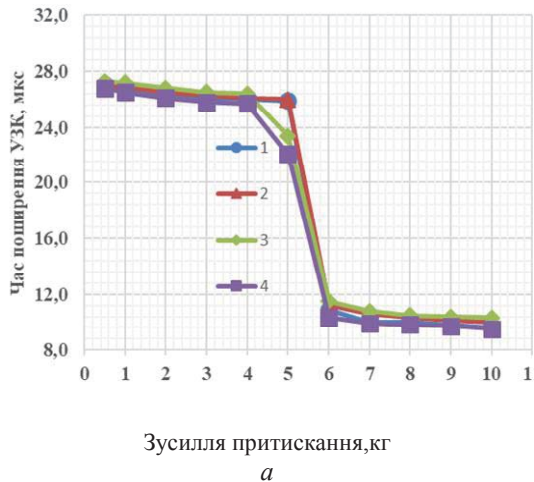


Рис. 3. Залежність «ЧПУЗК – зусилля притискання» (склад № 2) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 3. Dependence "time of ultrasound propagation – pressing forces" (composition No. 1) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

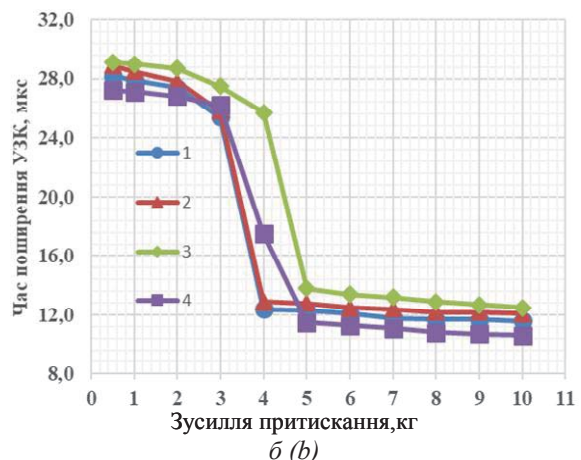
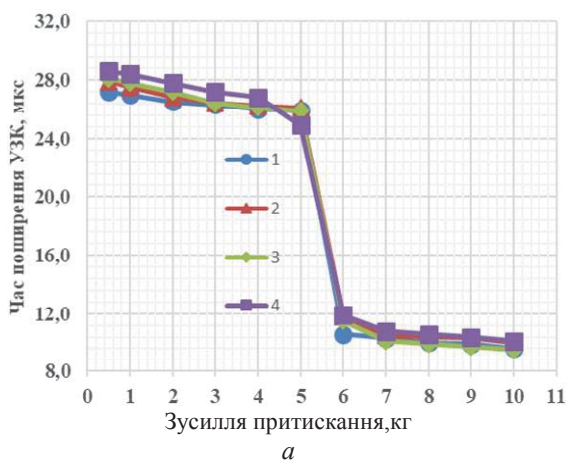


Рис. 4. Залежність «ЧПУЗК – зусилля притискання» (склад № 3) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 4. Dependence "time of ultrasound propagation – pressing forces" (composition No. 1) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

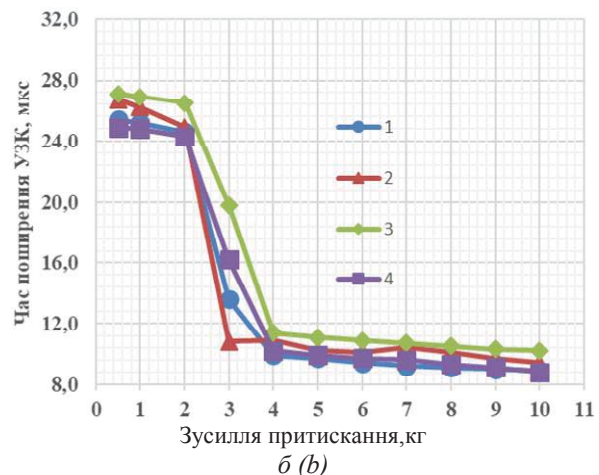
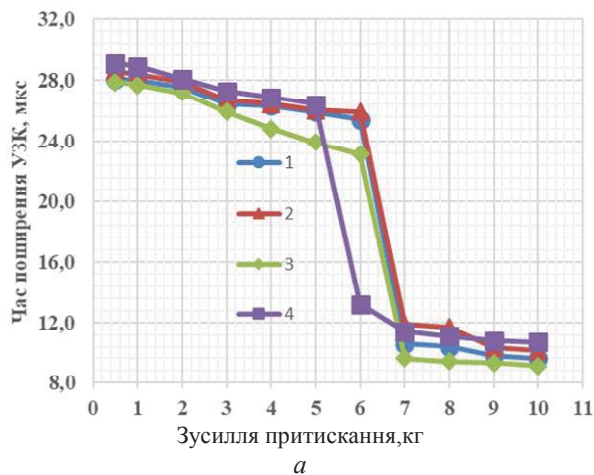


Рис. 5. Залежність «ЧПУЗК – зусилля притискання» (склад № 4) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 5. Dependence "time of ultrasound propagation – pressing forces" (composition No. 1) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

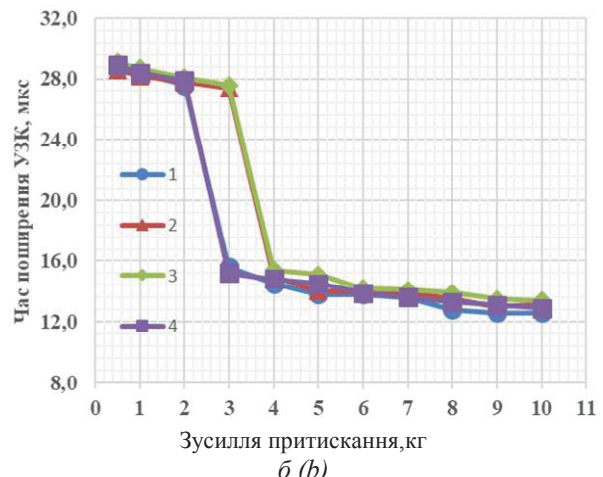
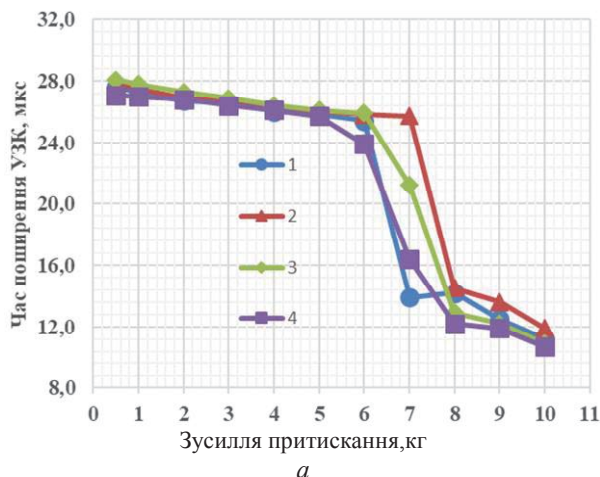


Рис. 6. Залежність «ЧПУЗК – зусилля притискання» (склад № 5) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 6. Dependence "time of ultrasound propagation – pressing forces" (composition No. 1) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

Результати статистичної обробки отриманих даних (рис. 2–6) наведено на рисунках 7–11.

Для кожного зразка результати вимірювань перебувають у межах довірчого інтервалу із забезпеченістю 0,95.

За результатами вимірювань зразки з дрібнозернистого бетону демонструють більшу однорідність, ніж зразки з важкого бетону за даними [7]. Межі «різкого» інтервалу в переважній більшості не перевищували 10% від усього діапазону вимірювань, а для третини зразків були ще менші. Коефіцієнт варіації також нижчий для всього інтервалу. Для першої «повільної» зони не перевищує 4,39%

(зниження на 100...150%). В межах другої «повільної» зони – 7,86% (зниження на 70...120%), а в межах «різкої» – 35,97% (зниження на 60...80%). Але, як і для важкого бетону, межі «різкої» зони не мають чіткого місця, а мігрують. Початок цієї зони є в межах 2-6 кг (зусилля притискання) а закінчення – 4-8 кг (зусилля притискання). Лише для 40% зразків другий «повільний» інтервал перебуває в тих межах, що рекомендовані виробниками приладів для проведення вимірювань.

Під час спільної обробки для всіх зразків максимальні та мінімальні значення ЧПУЗК виходять за межі довірчого інтервалу, що характеризує окремі залежності (окремо для

кожного складу бетону), як такі, що не належать до однієї генеральної сукупності.

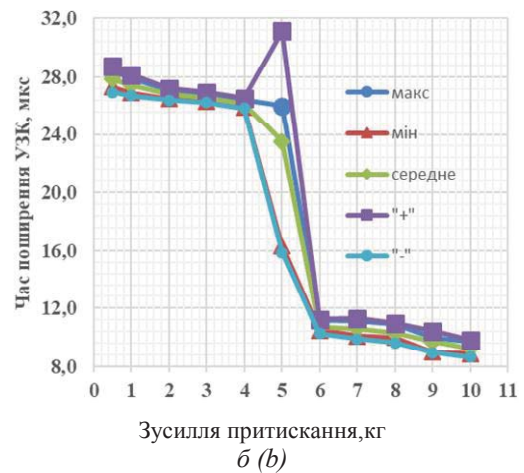
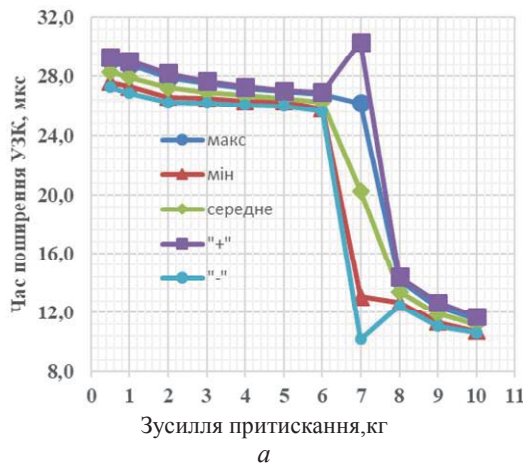


Рис. 7. Результати статистичної обробки даних (рис. 2) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 7. Results of statistical data processing (fig. 2) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

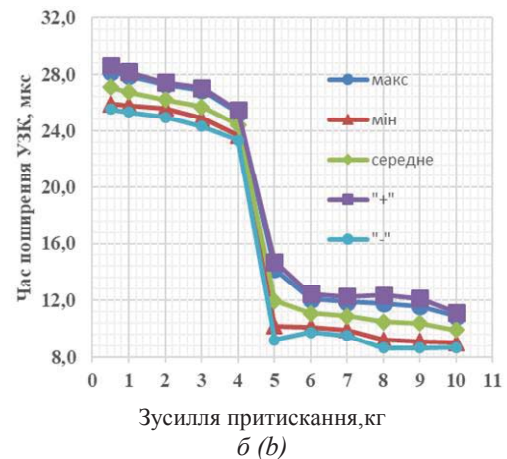
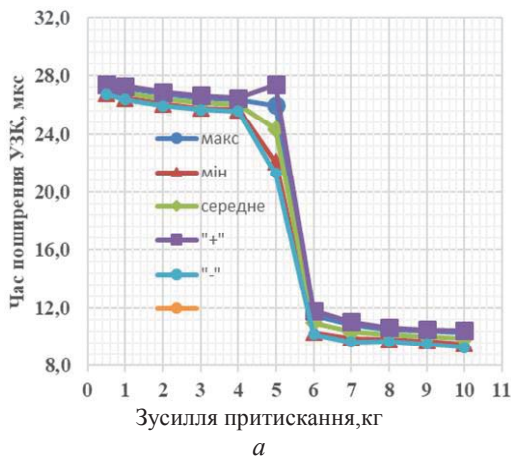


Рис. 8. Результати статистичної обробки даних (рис. 3) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 8. Results of statistical data processing (fig. 3) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

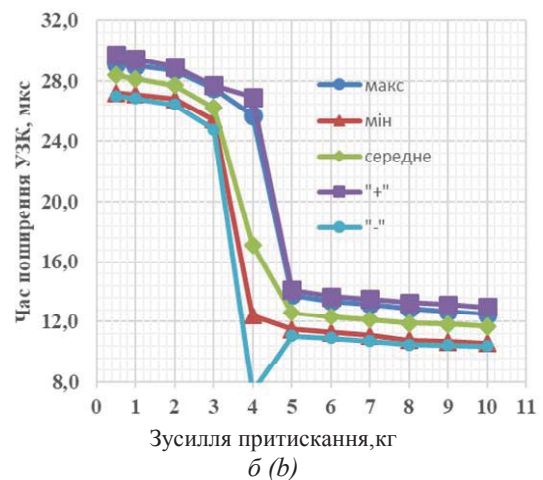
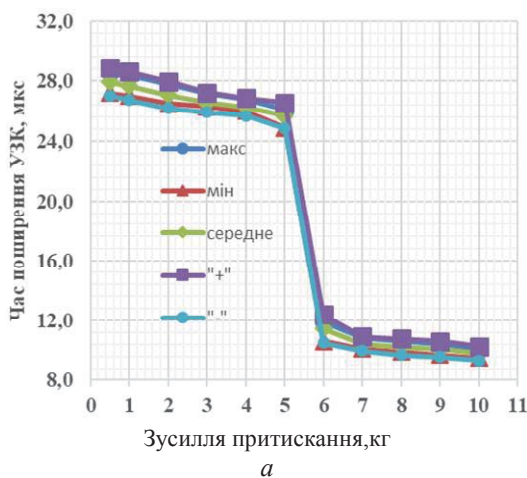


Рис. 9. Результати статистичної обробки даних (рис. 4) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 9. Results of statistical data processing (fig. 4) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

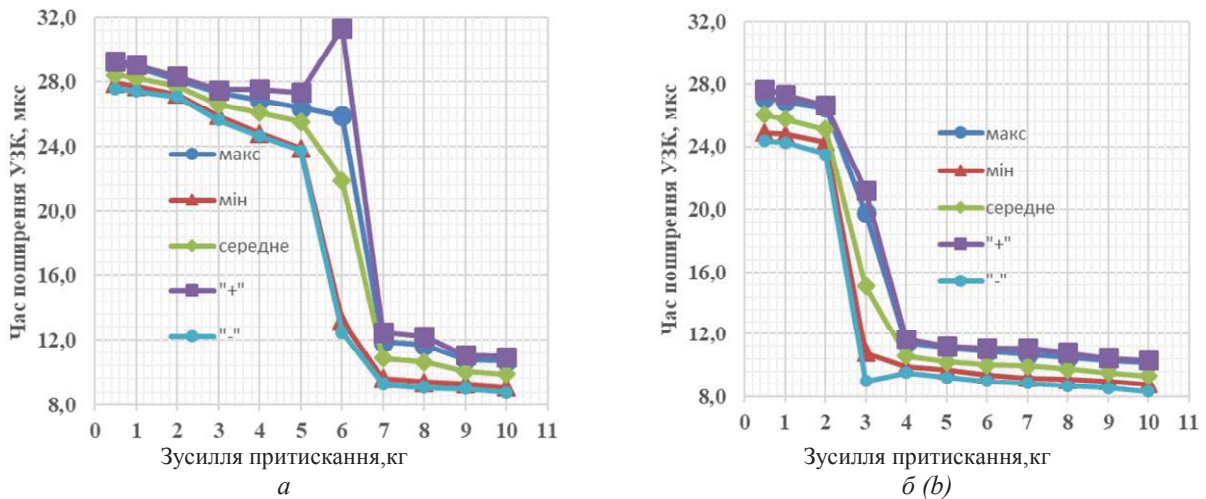


Рис. 10. Результати статистичної обробки даних (рис. 5) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 10. Results of statistical data processing (fig. 5) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

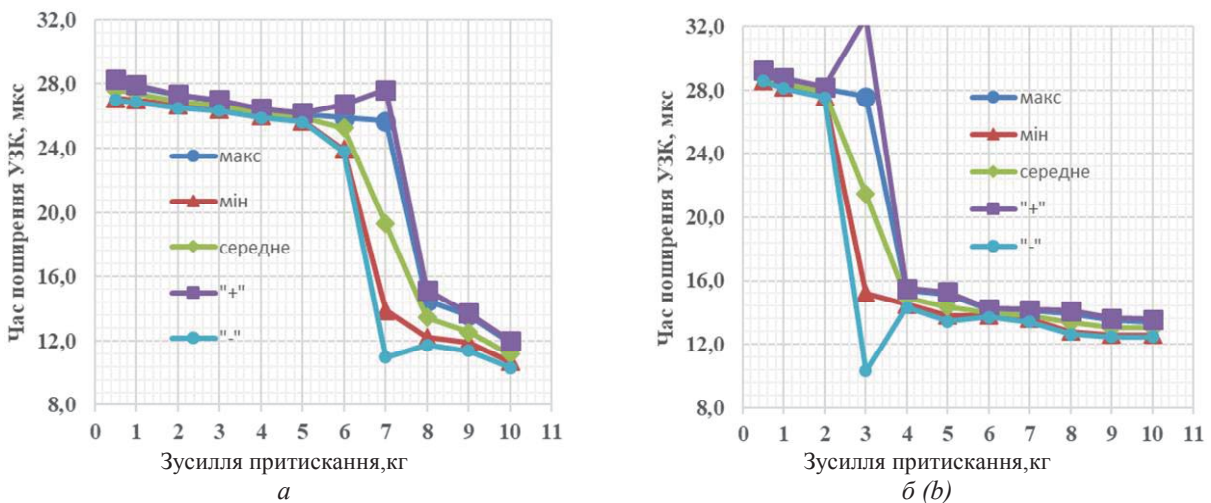


Рис. 11. Результати статистичної обробки даних (рис. 6) на поверхні, яка: а – контактувала з опалубкою; б – не контактувала з опалубкою / Fig. 11. Results of statistical data processing (fig. 6) on the surface, which: a – contact with the formwork; b – did not contact the formwork

Таким чином, і для дрібнозернистого бетону підтверджено вплив зусилля притискання приладу до бетону на результати вимірювань. Більш висока однорідність такого бетону порівняно зі звичайним важким бетоном все одно не дозволяє використовувати узагальнювальні залежності для визначення ФМХ бетону за результатами вимірювання ЧПУЗК за «сухого» контакту між приладом та бетоном.

Використання даних визначення ФМХ бетону як однієї зі складових перевірконого розрахунку конструкцій [8; 9] та в

подальшому для оцінювання технічного стану конструкцій будівель та споруд можливе лише в разі вдосконалення методики вимірювання ЧПУЗК.

Висновки. Аналіз наведених результатів підтвердив необхідність удосконалення існуючої методики визначення ФМХ бетону за допомогою ультразвукових приладів. Підвищення точності методики можна досягнути за рахунок зменшення впливу неоднорідності складу бетону та умов його виготовлення та експлуатації

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Komlos K. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards / K. Komlos, S. Popovics, T. Nürnbergerova, B. Babal, J. Popovics // *Cem. Concr. Compos.* – 1996. – Vol. 18. – Pp. 357–364. – Режим доступу : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946596000261#aeр-abstract-id6>
2. Breysse D. Nondestructive evaluation of concrete strength : An historical review and a new perspective by combining NDT methods / D. Breysse // *Construction Building Materials.* – 2012. – Vol. 33. – Pp. 139–163. – Режим доступу : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811007938>
3. Kolokhov V. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure / Victor Kolokhov, Artem Sopilniak, Grygorii Gasii, Alexander Kolokhov // *International Journal of Engineering and Technology.* – 2018. – Vol. 7. – № 4.8. – Pp. 74–78.
4. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності : ДСТУ Б В.2.7-226:2009. [Чинний від 2010-09-01]. – Київ : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 27 с. (Національний стандарт України).
5. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности : ГОСТ-17624-2012. [Дата введения 2014-01-01]. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с. (Межгосударственный стандарт).
6. Измеритель прочности бетона и стройматериалов Novotest ИПСМ / Novotest. Приборы контроля и качества : каталог // ООО НТЦ «Промышленное оборудование и технологии». – Новомосковск. – 2012. – 26 с. – Режим доступа : https://novotest.ua/media/novotest/novotest_catalogue_rus.pdf
7. Колохов В. В. Зміна часу поширення ультразвукових коливань у бетоні за зміни умов проведення вимірювань / В. В. Колохов, О. В. Колохов // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – 2019. – № 2. – С. 92–101.
8. Колохов В. В. Формализация процедуры определения физико-механических свойств бетона и её аппаратное обеспечение / В. В. Колохов // *Строительство, материаловедение, машиностроение.* – Вып. 69 – Днепропетровск : ПГАСА, 2013. – С. 231–236.
9. Колохов В. В. Некоторые аспекты применения методов неразрушающего контроля свойств бетона / В. В. Колохов // *Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference).* – Варшава, 2012. – Вып. 20. – С. 443–448.

REFERENCES

1. Komlos K., Popovics S., Nürnbergerova T., Babal B. and Popovics J. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cem. Concr. Compos.* 1996, vol. 18, pp. 357–364.
2. Breysse D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction Building Materials.* 2012, vol. 33, pp. 139–163.
3. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G. and Kolokhov O. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering & Technology.* 2018, vol. 7, no. 4.8, pp. 74–78.
4. *Betoni. Ul'trazvukovij metod viznachennya mitsnosti : DSTU B V.2.7-226:2009* [Concrets. Ultrasonic method for determining strength: DSTU B V.2.7-226: 2009]. Effective from 2010-09-01. Kyiv : DP Ukrarahbudinform, 2010, 27 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
5. *Betony. Ul'trazvukovoj metod opredeleniya prochnosti : GOST-17624-2012* [Concretes. Ultrasonic method for determining strength]. Introduction date 2014-01-01, Moscow : Standardinform, 2014, 16 p. (Interstate Standard). (in Russian).
6. *Izmeritel' prochnosti betona i strojmaterialov Novotest IPSM* [Measurement of strength of concrete and building materials Novotest IPSM]. *Novotest. Pribory kontrolya i kachestva* [Novotest. Control and quality devices: catalog]. Scientific and industrial center "Industrial equipment and technologies", Novomoskovsk, 2012, 26 p. (in Russian).
7. Kolokhov V.V. and Kolokhov O.V. *Zmina chasu poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvan' u betoni za zminy umov provedennya vymiryuvan'* [Changing the time of ultrasonic oscillation propagation in concrete for changing conditions of measurement]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 2, pp. 92–101. (in Ukrainian).
8. Kolokhov V.V. *Formalizaciya procedury opredeleniya fiziko-mehanicheskih svojstv betona i ee apparaturnoe obespechenie* [Formalization of the procedure for determining the physicomachanical properties of concrete and its hardware]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Engineering]. Vol. 69, Dnipropetrovsk, PSACEA, 2013, pp. 231–236. (in Russian).
9. Kolokhov V.V. *Nekotorye aspekty primeneniya metodov nerazrushayushego kontrolya svojstv betona* [Some aspects of the application of methods for non-destructive testing of concrete properties]. *Theoretical Foundations of Civil Engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference).* Warsaw, 2012, vol. 20, pp. 443–448. (in Russian).

Надійшла до редакції: 14.06.2019 р.