

УДК 666.972.16:627.8

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.2.2.34>

ГІДРОТЕХНІЧНИЙ БЕТОН НА ДРІБНИХ НАПОВНЮВАЧАХ

Грінченко Р. О. – асистент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0009-0004-0185-9818

У статті розглянуто вплив гранулометричного складу дрібного заповнювача та застосування сучасних хімічних добавок на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики гідротехнічного бетону. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення довговічності та надійності гідротехнічних споруд в умовах постійного впливу водного середовища, а також обмеженою доступністю якісних природних пісків із оптимальним зерновим складом в Україні.

Метою роботи є дослідження можливості отримання гідротехнічного бетону з використанням місцевих дрібнозернистих пісків шляхом оптимізації складу бетонної суміші та застосування комплексу хімічних добавок. У ході досліджень було виготовлено серію бетонних зразків із різними варіантами модифікації складу, зокрема із застосуванням суперпластифікуючих, повітров'язувальних та гідрофобних добавок. Визначалися основні показники якості бетону: міцність на стиск, морозостійкість, водонепроникність та водопоглинання.

Отримані результати показали, що зниження водоцементного відношення до 0,44 у поєднанні з використанням сучасних добавок забезпечує суттєве підвищення міцності бетону, а також значне покращення його довговічності. Встановлено, що застосування суперпластифікаторів дозволяє зменшити водопотребу суміші без втрати її рухливості, тоді як повітров'язувальні та гідрофобні добавки сприяють підвищенню морозостійкості та водонепроникності відповідно.

Доведено, що навіть за використання дрібних пісків, які не повністю відповідають стандартним вимогам, можливо отримати бетон із високими експлуатаційними характеристиками. Показано, що комплексне застосування хімічних добавок дозволяє компенсувати недоліки місцевих матеріалів і забезпечити формування цілотної структури цементного каменю. Отримані результати мають практичне значення для виробництва гідротехнічного бетону в умовах обмежених ресурсів та сприяють підвищенню ефективності будівництва і відновлення гідротехнічних споруд.

Ключові слова: гідротехнічний бетон, морозостійкість, водопоглинання, хімічні добавки.

Grinchenko R. O. Hydraulic concrete based on fine aggregates

This paper investigates the influence of the granulometric composition of fine aggregates and the application of modern chemical admixtures on the physical, mechanical, and durability properties of hydraulic concrete. The relevance of the study is driven by the need to enhance the durability and reliability of hydraulic structures operating under continuous water exposure, as well as by the limited availability of high-quality natural sands with optimal particle size distribution in Ukraine.

The aim of the research is to evaluate the feasibility of producing hydraulic concrete using locally available fine sands through mix design optimization and the incorporation of chemical admixtures. A series of concrete specimens with varying compositions was prepared, including mixtures modified with superplasticizers, air-entraining agents, and hydrophobic admixtures. The key performance indicators assessed were compressive strength, frost resistance, water resistance, and water absorption.

The results demonstrate that reducing the water–cement ratio to 0.44, in combination with the use of advanced admixtures, leads to a significant improvement in both strength and

© Грінченко Р. О., 2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

durability characteristics. The use of polycarboxylate-based superplasticizers effectively reduces water demand while maintaining workability, resulting in a denser cement matrix. Air-entraining admixtures enhance frost resistance by creating a stable system of uniformly distributed closed pores, whereas hydrophobic admixtures improve water resistance by limiting capillary absorption.

It is shown that even fine sands that do not fully comply with standard requirements can be successfully utilized in hydraulic concrete production when appropriate admixture systems are applied. The combined use of chemical admixtures compensates for the недостатки of local materials and promotes the formation of a dense and durable microstructure. The findings have practical significance for the production of cost-effective hydraulic concrete and contribute to improving the efficiency and sustainability of hydraulic infrastructure construction and rehabilitation.

Key words: hydraulic concrete, frost resistance, water absorption, chemical admixtures.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інфраструктури, енергетики та водного господарства вимагає застосування матеріалів, здатних забезпечити довговічність і надійність споруд в умовах постійного впливу водного середовища. У цьому контексті гідротехнічний бетон виступає ключовим конструкційним матеріалом, що забезпечує безпеку та ефективність експлуатації таких споруд.

Особливої актуальності питання якості та довговічності гідротехнічного бетону набуває в умовах модернізації та відновлення об'єктів водної інфраструктури України, зокрема на спорудах каскаду Дніпровської ГЕС та інших гідровузлах басейну Дніпра. Пошкодження гідротехнічних споруд унаслідок воєнних дій і природного зношення підсилює потребу в застосуванні матеріалів із підвищеною водонепроникністю, морозостійкістю, тріщиностійкістю та стійкістю до сульфатної корозії.

Таким чином, дослідження властивостей, довговічності та інноваційних підходів до виробництва гідротехнічного бетону є стратегічно важливим завданням сучасної будівельної науки. Воно спрямоване на підвищення експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, зменшення витрат на їх утримання та забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів.

Важливими властивостями бетону в гідротехнічних спорудах для всіх кліматичних поясів України є здатність протидіяти агресивному впливу солей, розчинених у воді, поперемінному зволоженню, кліматичним циклам заморожування та відтавання. Саме ці властивості характеризують довговічність гідротехнічного бетону, який використовується в споруді.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі технології бетону свідчить про зростаючу увагу до ролі дрібного заповнювача у формуванні структури та експлуатаційних властивостей бетону, зокрема гідротехнічного призначення. Дрібний заповнювач, а саме пісок, є одним із ключових компонентів бетонної суміші, який визначає характер ущільнення зернового складу та безпосередньо впливає на порову структуру матеріалу.

У численних роботах відзначається, що гранулометричний склад піску є визначальним фактором формування щільноупакованої структури бетону. Оптиміальне співвідношення частинок різного розміру забезпечує більш ефективне заповнення міжзернового простору, що, у свою чергу, сприяє зменшенню загальної пористості суміші. Встановлено, що використання пісків із безперервною кривою зернового складу дозволяє досягти максимальної щільності укладання зерен, тоді як наявність розривів у гранулометричному складі призводить до утворення додаткових пор і, відповідно, до погіршення фізико-механічних характеристик бетону.

Окремі дослідження присвячені впливу вмісту дрібних і пилюватих частинок у піску. Встановлено, що надлишок надтонких фракцій може збільшувати

водопотребу бетонної суміші через підвищену питому поверхню зерен, що негативно впливає на водоцементне відношення. Водночас повна відсутність дрібних фракцій також є небажаною, оскільки це призводить до збільшення пустотності та зниження щільності структури. Таким чином, ключовим завданням є досягнення оптимального балансу між різними фракціями піску.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено інтерфейсній перехідній зоні (Interfacial Transition Zone, ITZ), яка формується на межі контакту між зернами заповнювача та цементним каменем. Доведено, що саме ця зона є найбільш слабкою ланкою в структурі бетону через підвищену пористість і наявність мікрodefektів. У роботах встановлено, що зменшення товщини та дефектності ITZ досягається за рахунок оптимізації гранулометричного складу заповнювачів, зниження водоцементного відношення, а також використання мінеральних і хімічних добавок. Покращення характеристик цієї зони безпосередньо впливає на підвищення міцності, тріщиностійкості та довговічності бетону.

Суттєвий внесок у розвиток технології бетону зробили дослідження, спрямовані на зниження водоцементного відношення без погіршення технологічних властивостей бетонної суміші. У цьому контексті широко досліджується використання суперпластифікаторів нового покоління, зокрема на основі полікарбоксилатних ефірів. Встановлено, що такі добавки забезпечують ефективне диспергування цементних частинок, зменшуючи внутрішнє тертя в системі та дозволяючи значно знизити витрату води. Це сприяє формуванню більш щільної мікроструктури цементного каменю та, відповідно, підвищенню міцності й довговічності бетону.

Окремий напрям досліджень присвячений використанню повітровтягувальних добавок, які забезпечують формування системи рівномірно розподілених замкнених повітряних пор. Такі пори виконують функцію компенсаційних резервуарів при замерзанні води, що значно підвищує морозостійкість бетону. Встановлено, що оптимальна кількість та розподіл повітряних пор дозволяє зменшити внутрішні напруження, які виникають під час циклічного заморожування та відтавання.

Не менш важливими є дослідження, пов'язані з використанням гідрофобних добавок, які змінюють поверхневі властивості капілярної системи бетону. Завдяки зниженню змочуваності внутрішніх поверхонь пор досягається значне зменшення капілярного підсосу води, що позитивно впливає на водонепроникність та довговічність матеріалу в умовах тривалого контакту з водним середовищем.

Аналіз сучасних наукових джерел також свідчить про активний розвиток підходів, спрямованих на використання місцевих сировинних ресурсів у виробництві бетонів. У багатьох країнах проводяться дослідження, спрямовані на адаптацію складів бетонних сумішей до властивостей доступних заповнювачів, у тому числі дрібнозернистих пісків. Встановлено, що за рахунок комплексного використання хімічних добавок і оптимізації складу суміші можливо компенсувати недоліки місцевих матеріалів і забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики бетону.

Таким чином, результати аналізу сучасних досліджень підтверджують, що ключовими напрямками підвищення якості гідротехнічного бетону є оптимізація гранулометричного складу дрібного заповнювача, зниження водоцементного відношення та використання ефективних хімічних добавок. Комплексний підхід до вирішення цих завдань дозволяє формувати щільну, малопористу структуру бетону, що забезпечує його високу міцність, водонепроникність і довговічність в умовах експлуатації гідротехнічних споруд.

Проблематика. Як показує досвід, отримати якісні наповнювачі у великих промислових обсягах для виробництва гідротехнічного бетону не завжди можливо. Основні проблеми, які виникають під час постачання таких матеріалів наступні: відсутність необхідної кількості самих матеріалів, велика вартість, довге логістичне плече, що призводить до збільшення собівартості. Особливо великою проблемою для України є відсутність в достатній кількості пісків з середнім модулем крупності (1,5-2,0). Як зазначено в [1], природні піски України за зерновим складом і вмістом домішок переважно не відповідають вимогам державних стандартів до бетонів і потребують збагачення. Так для прикладу в таблиці 1 наведено розсів пісків з різних кар'єрів.

Перераховані причини призводять до потреби в пошуку шляхів отримання бетону, який відповідає заданим характеристикам, використовуючи місцеві доступні піски, які не завжди відповідають вимогам стандартів. Одним із шляхів вирішення проблеми є використання хімічних добавок під час виготовлення суміші.

Мета дослідження. Прослідкувати як впливають добавки на показники бетону із застосуванням дрібного піску та проаналізувати, чи можливо отримати бетон для гідротехнічних споруд із застосуванням місцевих дешевих наповнювачів. Для досліджень використовувалися добавки, які були розроблені спільно з фахівцями ТОВ «Синтез-Ф» та кафедрою гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії Херсонського державного аграрно-економічного університету.

Під час дослідження визначалися наступні показники: водопоглинання за масою, водонепроникність, морозостійкість, міцність на стиск.

Таблиця 1

Розмір отворів сит, мм	Кар'єр Новаки		Кар'єр Грозино		Кар'єр Бориспіль	
	Відсоток, %	Повні залишки, %	Відсоток, %	Повні залишки, %	Відсоток, %	Повні залишки, %
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,26
2,5	0,01	0,01	0,03	0,03	1,41	1,67
1,25	0,73	0,74	0,10	0,12	2,20	3,87
0,63	7,02	7,76	9,92	10,04	11,72	15,59
0,315	41,09	48,85	27,99	38,03	12,20	27,79
0,14	34,22	83,07	41,98	80,01	64,49	92,28
дно	16,93		20,00		7,72	
Всього	100,00		100,00		100,00	
Модуль крупності	1,40		1,28		1,41	

Виклад основного матеріалу. Згідно з [4], до гідротехнічного бетону є наступні вимоги: використання портландцементу з вмістом С3А не більше 8% та водоцементне відношення в суміші не більше 0,45. Для виготовлення зразків бетону, використовувався портландцемент ПЦ 500, гранітний щебінь 5х20, пісок з Мк- 1.48, суперпластифікатор, повітровтягувальна та гідрофобна добавка. Зразки виготовлювалися в формах (куб) 10х10х10см, та 15х15х15см (для визначення водонепроникності). Було виготовлено 4 партії зразків (таблиця 1), в якості контрольної партії були виготовлені зразки, де не використовувалися хімічні добавки. Для всіх партій кількість цементу була однаковою – 420 кг/м³. Витрата води для

кожної партії підбиралася окремо, щоб отримати однакову осадку конусу – 14 см. У таблиці 3 наведено кількість води з урахуванням води, яка міститься у водному розчині добавки.

Таблиця 2

Хімічна добавка	Контроль	Партія 2	Партія 3	Партія 4	Партія 5
	дозування, % від маси цементу				
SYNTEZ FM-32 Суперпластифікатор	-	0,6	0,6	0,6	0,6
SYNTEZ LP-2 Повітровтягувальна	-	-	0,2	-	0,2
SYNTEZ DM-14 Гідрофобна	-	-	-	1	1

Випробовування зразків проводилося згідно з ДСТУ. Отримані дані представлені в таблиці 3.

Під час аналізу показників контрольних зразків зробили висновок, що застосування бетонної суміші без використання хімічних добавок для гідротехнічних споруд не є доцільним, оскільки не основні характеристики бетону не відповідають вимогам. Як альтернативний варіант, під час підбору складу бетонної суміші можна рухатися в сторону збільшення витрати цементу, але це призведе до необґрунтованого збільшення собівартості. Також для бетонів з великим вмістом цементу необхідно врахувати такий негативний фактор як підвищення температури суміші під час гідратації цементу, що є критичним під час спорудження масивних гідротехнічних споруд.

Таблиця 3

Показник	Контроль	Партія 2	Партія 3	Партія 4	Партія 5
Вода, л/м ³	231	185	185	185	185
В/Ц	0,55	0,44	0,44	0,44	0,44
середня міцність, кг/см ²	354	487	478	493	481
Морозостійкість, F	75	200	300	400	500
Водопоглинання, %	7,1	4,6	4,1	2,1	2,0
Водонепроникність, W	4	10	10	12	Більше 12

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що зниження водоцементного відношення до 0,44 забезпечує не лише покращення окремих фізико-механічних показників бетону, але й сприяє комплексній оптимізації його структури на мікро- та макрорівнях. Отримані результати свідчать про те, що підвищення середньої міцності супроводжується одночасним зростанням морозостійкості та водонепроникності, що є ознакою формування більш щільної, однорідної та малопористої структури цементного каменю.

Слід зазначити, що зменшення водопоглинання з 7,1 % до 2,0–4,6 % має чітко виражений кореляційний зв'язок із підвищенням показників водонепроникності та морозостійкості. Це підтверджує гіпотезу про те, що ключовим фактором довговічності гідротехнічного бетону є саме зниження об'єму відкритих капілярних пор, які забезпечують проникнення води та агресивних середовищ у структуру матеріалу. У свою чергу, ущільнення структури бетону призводить до підвищення його опору циклічним процесам заморожування та відтавання.

Аналіз результатів дослідження зразків партії 2, у складі яких використовувався суперпластифікатор на основі полікарбосилатів, показує, що застосування сучасних хімічних добавок дозволяє суттєво знизити водопотребу бетонної суміші без втрати її рухливості. Це, у свою чергу, дає можливість досягти нормативних показників гідротехнічного бетону навіть при використанні дрібнозернистих пісків, які за своїми природними характеристиками не повністю відповідають вимогам стандартів.

Додатково встановлено, що введення повітровтягувальних та гідрофобних добавок (партії 3, 4, 5) дозволяє цілеспрямовано регулювати експлуатаційні властивості бетону. Зокрема, повітровтягувальні добавки сприяють формуванню рівномірно розподіленої системи замкнених пор, які виконують роль резервуарів для розширення води при замерзанні, тим самим підвищуючи морозостійкість матеріалу. Водночас гідрофобні добавки знижують змочуваність капілярних стінок, що обмежує проникнення води вглиб структури бетону.

Особливої уваги заслуговують результати, отримані для зразків партії 5, де застосовано комплексну дію декількох типів добавок. У цьому випадку досягнуто максимальних показників морозостійкості (F500), мінімального водопоглинання (2,0 %) та найвищого рівня водонепроникності (понад W12). Це свідчить про синергетичний ефект від одночасного використання суперпластифікуючих, повітровтягувальних та гідрофобних компонентів, що забезпечує формування оптимальної структури бетону для роботи в умовах постійного гідростатичного тиску та агресивного водного середовища.

Проведені дослідження також підтверджують можливість ефективного використання місцевих дрібних пісків у виробництві гідротехнічного бетону. Незважаючи на те, що такі піски часто не відповідають вимогам щодо гранулометричного складу, застосування сучасних хімічних добавок дозволяє компенсувати їхні недоліки та забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики матеріалу.

Економічний аналіз показує, що використання добавок призводить до збільшення собівартості бетонної суміші в середньому на 3–7 %, однак ці витрати повністю компенсуються за рахунок використання місцевих сировинних ресурсів та зниження транспортних витрат. Таким чином, запропонований підхід є не лише технічно ефективним, але й економічно доцільним.

Отримані результати свідчать про значний потенціал застосування дрібних пісків у поєднанні з сучасними модифікуючими добавками для виробництва гідротехнічних бетонів із підвищеними експлуатаційними характеристиками. Разом із тим, для більш повної оцінки довговічності таких матеріалів доцільним є проведення додаткових досліджень, зокрема щодо сульфатостійкості, тріщиностійкості, усадочних деформацій, а також поведінки бетону в умовах тривалої експлуатації під дією реальних навантажень і факторів навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Wu, B., Li, S., & Jiang, C. Study on the performance evolution of hydraulic concrete under the alternating action of freeze-thaw and abrasion. *Buildings*, 2024. 14(5), 1369. <https://doi.org/10.3390/buildings14051369>
2. Zhu, X., et al. Performance degradation law and model construction of hydraulic concrete under freeze-thaw cycles. *Buildings*, 2025. 15(10), 1596. <https://doi.org/10.3390/buildings15101596>
3. Hydraulic concrete durability with industrial byproducts (metakaolin, foundry sand). 2025. *Cleaner Materials*, 16, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100312>

4. Державна комісія України по запасах корисних копалин при Міністерстві охорони навколишнього природного середовища України. Наказ від 25.06.2007 № 198, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 13.07.2007 за № 819/14086.
5. Neville A. M. Properties of Concrete. 5th ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2011. 846 p.
6. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 704 p.
7. Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. 644 p.
8. Aïtcin P.-C. High Performance Concrete. London : CRC Press, 1998. 591 p.
9. Thomas M. D. A., Bentz E. C. Concrete durability. Boca Raton : CRC Press, 2022. 398 p.
10. Powers T. C. The properties of fresh concrete // Proceedings of the American Concrete Institute. 1968. Vol. 65. P. 535–548.
11. Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 683 с.

REFERENCES:

1. Wu, B., Li, S., & Jiang, C. (2024). Study on the performance evolution of hydraulic concrete under the alternating action of freeze–thaw and abrasion. Buildings, 14(5), 1369. <https://doi.org/10.3390/buildings14051369>
2. Zhu, X., et al. (2025). Performance degradation law and model construction of hydraulic concrete under freeze-thaw cycles. Buildings, 15(10), 1596. <https://doi.org/10.3390/buildings15101596>
3. Hydraulic concrete durability with industrial byproducts (metakaolin, foundry sand). (2025). Cleaner Materials, 16, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100312>
4. State Commission of Ukraine on Mineral Resources. (2007). Order No. 198 of June 25, 2007 (registered July 13, 2007, No. 819/14086).
5. Neville A. M. (2011). Properties of Concrete. 5th ed. Harlow : Pearson Education Limited, 846 p.
6. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 704 p.
7. Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. (2003). 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 644 p.
8. Aïtcin P.-C. (1998). High Performance Concrete. London : CRC Press, 591 p.
9. Thomas M. D. A., Bentz E. C. (2022). Concrete durability. Boca Raton : CRC Press, 398 p.
10. Powers T. C. (1968). The properties of fresh concrete // Proceedings of the American Concrete Institute. Vol. 65. P. 535–548.
11. Syvyi, M., Paranko, I., & Ivanov, Y. (2013). Neohrafiia mineralnykh resursiv Ukrainy [Geography of mineral resources of Ukraine]. Prostir M.

Дата першого надходження статті до видання: 14.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.05.2026