

Краснянський Григорій Юхимович

Кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, <https://orcid.org/0000-0002-2421-1270>
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Клапченко Василь Іванович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, <https://orcid.org/0000-0002-4093-5500>
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Азнаурян Ірина Олександрівна

Доцент кафедри фізики, <https://orcid.org/0000-0002-7085-7291>
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ОЦІНКА МОРОЗОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ ПРИ ЗНАКОЗМІННОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Анотація. Однією з найважливіших характеристик будівельних матеріалів є їхня морозостійкість. При цьому стандартний метод її визначення, який базується на фіксації числа циклів поперемінного заморожування та відтавання, не завжди відповідає вимогам виробництва будівельних матеріалів, зокрема таким, що висуваються до довговічності будівель і споруд та має низку істотних недоліків. Детальне зіставлення результатів лабораторних випробувань морозостійкості бетонів та термінів їхньої служби в реальних спорудах не дає змогу в загальному випадку встановити між ними пряму відповідність. У зв'язку з цим надзвичайної актуальності набувають дослідження, які присвячені розробці прискорених методів визначення морозостійкості. Нові методи мають усунути основну складність зазначеної проблеми, яка полягає в невідповідності умов лабораторних досліджень тим реальним умовам, в яких перебуває даний матеріал в конструкціях і спорудах, що експлуатуються. Для отримання інформації про морозостійкість бетону в реальних умовах експлуатації запропоновано комбінований кондуктометричний метод незалежного виміру кінетики дифузії вологи та льодоутворення в процесі одностороннього заморожування зразків. Показано, що в зразках бетону, які піддаються односторонньому заморожуванню (тобто перебувають в умовах, що максимально наближені до реальних умов експлуатації в будівельних конструкціях), проходять інтенсивні процеси масоперенесення. Визначено швидкості поширення фронту льодоутворення та дифузії вологи і відповідна глибина промерзання зразків бетону залежно від їх капілярно-пористої структури та початкових умов зберігання. Загалом проведені дослідження допомогли отримати більш достовірну картину поведінки бетону при знакозмінному температурному навантаженні в умовах різного початкового вологовмісту (у т. ч. в гідротехнічних спорудах), ніж це передбачено чинними нормативними документами. Експресність вимірювань уможливило використовувати запропонований метод для оцінки морозостійкості матеріалів при односторонньому заморожуванні в реальних умовах експлуатації, а також ефективно керувати технологією виготовлення будівельних матеріалів із заданими властивостями.

Ключові слова: морозостійкість; будівельні матеріали; бетон; кондуктометричний метод; кінетика дифузії вологи; льодоутворення; одностороннє заморожування зразків; знакозмінне температурне навантаження; управління технологією

Вступ

Однією з найважливіших характеристик будівельних матеріалів є їхня морозостійкість. При цьому стандартний метод її визначення, який базується на фіксації числа циклів поперемінного заморожування та відтавання, не завжди відповідає вимогам виробництва будівельних матеріалів, зокрема таким, що висуваються до довговічності будівель та споруд, та має низку істотних недоліків.

По-перше, прямий вимір морозостійкості матеріалів у циклах потребує спеціального обладнання та великих витрат часу (до кількох місяців), що унеможливило ефективно керувати технологічним процесом виготовлення будівельних матеріалів із заданою морозостійкістю.

По-друге, детальне зіставлення результатів лабораторних випробувань морозостійкості бетонів і термінів їх служби в реальних спорудах не дає змоги в загальному випадку встановити між ними пряму

відповідність. У зв'язку з цим надзвичайної актуальності набувають дослідження, які присвячені розробці прискорених методів визначення морозостійкості [1; 2]. Нові методи мають усунути основну складність зазначеної проблеми, яка полягає в невідповідності умов лабораторних досліджень тим реальним умовам, в яких перебуває даний матеріал в конструкціях і спорудах, що експлуатуються. Раніше нами було запропоновано методику оцінки морозостійкості бетону при реальних температурах експлуатації на основі результатів вимірювань за температур, що регламентуються чинними стандартами [3]. Крім того, здебільшого реальні конструкції піддаються односторонньому заморожуванню, а кореляційний взаємозв'язок цього процесу з процесом всебічного заморожування досі не знайдено.

Авторами робіт [4; 5] зроблено спроби зв'язати морозостійкість бетону із співвідношенням обсягу макро- та мікропор. Однак, на наш погляд, для більш детального вивчення механізмів морозного руйнування будівельних матеріалів необхідно одночасно мати інформацію про кінетику міграції води в процесі одностороннього заморожування (включаючи термовологодифузію до холодної поверхні зразка) та кінетику льодоутворення.

Відомо, що в бетоні, якій піддається в реальних умовах експлуатації односторонньому заморожуванню, внаслідок неоднорідності розподілу води проходять інтенсивні процеси масоперенесення, які суттєво впливають на його стійкість до знакомінних температурних навантажень. Водночас кондуктометричні методи мають високу чутливість до фізико-хімічних процесів, що відбуваються в бетоні, зокрема таких, як зміна фазового стану порової води, її хімічного складу, концентрації і температури [6]. Внаслідок цього вимірювання електропровідності можуть бути використані для отримання додаткової інформації про морозостійкість бетону при односторонньому заморожуванні. Особливості поведінки електропровідності, що спостерігаються при цьому, можуть бути інтерпретовані на підставі існуючих уявлень про кінетику льодоутворення та дифузії води в капілярно-пористих матеріалах [7 – 9].

Мета роботи

Метою роботи є розроблення комбінованого метода незалежного вимірювання кінетики дифузії води та льодистості в бетоні, який би дав змогу визначити швидкості поширення фронту льодоутворення та вологопровідності залежно від складу (капілярно-пористої структури) зразків, оцінювати морозостійкість матеріалів при односторонньому заморожуванні в реальних умовах

експлуатації та ефективно керувати технологією виготовлення будівельних матеріалів із заданими властивостями.

Виклад основного матеріалу

Методика експерименту

Кінетику льодоутворення та міграції води в процесі одностороннього заморожування досліджували на зразках цементно-піщаного розчину, що затвердів, у віці 28 діб. Розміри зразків становили 40×40×80 мм. Електроди з нержавіючої сталі діаметром 2,5 мм поміщали у верхню та нижню грань зразків при формуванні на відстані 1 см один від одного.

Вимірювання електропровідності проводили на змінному струмі частотою 10 кГц за методикою, описаною в [6]. Зразки, що зазнавали одностороннього заморожування, поміщали в теплоізоляційну касету. Перед вимірюванням частину зразків насичували водою за кімнатної температури протягом 48 годин, а частину витримували на повітрі. Фіксацію проходження води проводили методом сольової мітки, для чого теплий торець зразку зволожували 4% розчином хлористого натрію у воді.

Результати та їх обговорення

Для більш детального вивчення механізмів морозного руйнування будматеріалів необхідно одночасно мати інформацію про кінетику льодоутворення та міграцію води в процесі їхнього одностороннього заморожування. Нижче наведено можливість визначення швидкості поширення фронту льодистості та дифузії води в будівельних матеріалах кондуктометричним методом. Розташування електродних пар у досліджуваних зразках показано на рис. 1, а результати вимірювань електропровідності σ наведено на рис. 2, 3.

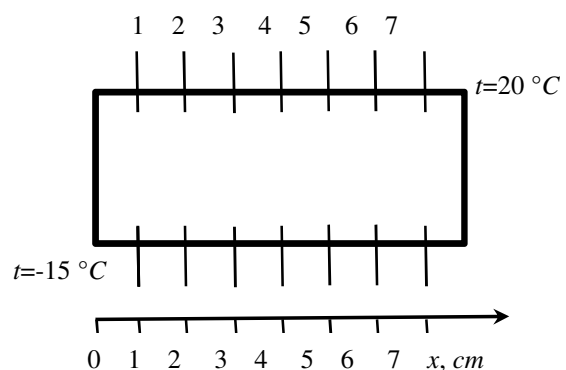


Рисунок 1 – Експериментальний зразок цементно-піщаного розчину (1...7 – номери електродних пар)

Як видно з рис. 2, електропровідність зразка, що перебував до досліду в умовах повітряного зберігання, змінюється в різних перерізах зразка за

різними законами. Такі ж залежності електропровідності від часу спостерігаються і для водонасиченого зразка з тією різницею, що зміни електропровідності, які відбуваються у відповідні набагато менш виражені.

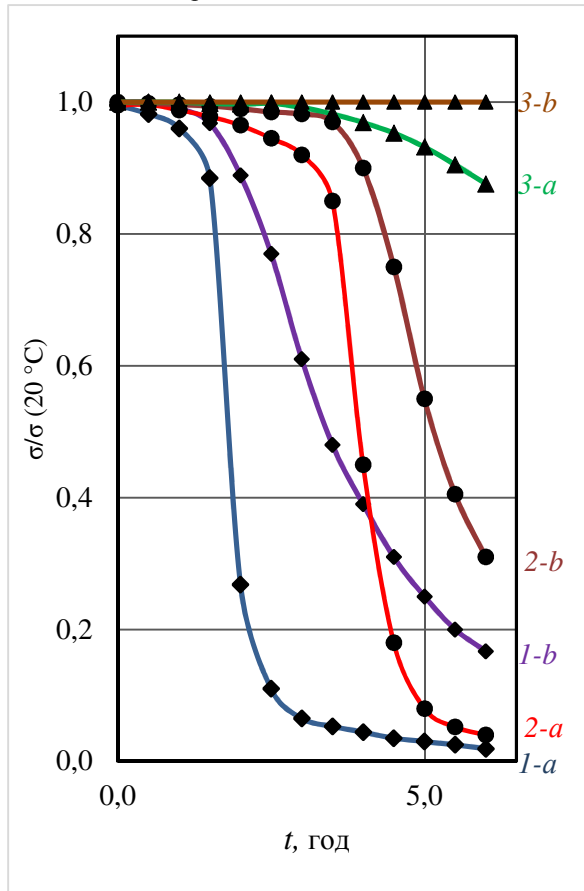


Рисунок 2 – Залежність електропровідності σ зразка цементно-піщаного розчину від часу t заможування: a – водонасичений зразок; b – зразок повітряного зберігання (нумерація кривих відповідає номерам електродних пар)

У початковий момент часу температура однакова по всій довжині зразка, а волога в його порах перебуває в рівноважному стані. Цьому відповідають значення електропровідності, що майже збігаються для всіх перерізів зразка. Надалі процес льодоутворення, що починається від холодної грані зразка, супроводжується встановленням градієнта температури та виникненням термо- та концентраційної дифузії вологи. При цьому відповідні дифузійні потоки спрямовані в бік, що протилежний напрямку поширення фронту льодоутворення.

Відомо [10; 11], що при зміні температури електропровідність цементного каменю та бетону змінюється за експоненціальним законом. Отже, зменшення температури в деякому перерізі зразка з часом має призводити до падіння електропровідності. Електропровідність повинна зменшитися також внаслідок зниження вмісту

вологи у відповідній зоні, яке обумовлене термовологопереносом. Менша температура та більший градієнт температури поблизу холодної грані зразка викликають такий перерозподіл вологи по об'єму зразка, що виникає градієнт концентрацій, який збігається за напрямком з градієнтом температури. Водночас зазначене зменшення вмісту вологи може компенсуватися відтісненням в область, що розглядається, незамерзлої води при льодоутворенні. Незначне зниження електропровідності, що спостерігається на початковому етапі охолодження, свідчить про переважний внесок перших двох з описаних механізмів.

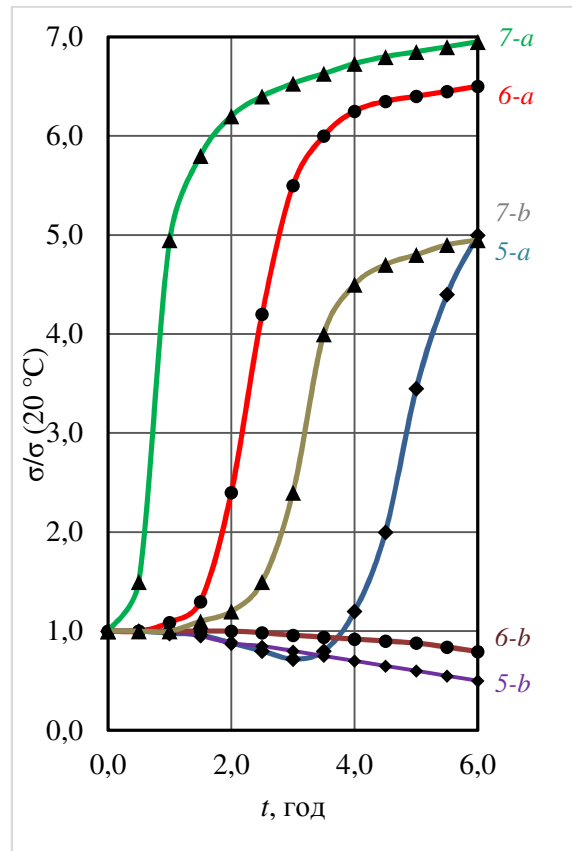


Рисунок 3. Залежність електропровідності σ зразка цементно-піщаного розчину від часу t заможування: a – водонасичений зразок; b – зразок повітряного зберігання (нумерація кривих відповідає номерам електродних пар)

Стрибокподібне зменшення електропровідності в місцях розташування електродних пар 1 та 2 вказує на досягнення цих перерізів зразка фронтом льодоутворення. Дійсно, питома електропровідність льоду істотно менша за питому електропровідність порової вологи. При цьому менша зміна електропровідності у відповідному інтервалі часу для водонасиченого зразка може бути пояснена на підставі таких міркувань. При заможуванні водонасиченого бетону лід, що утворюється в поверхневій зоні, створює підвищений тиск у відтісненій рідкій фазі,

внаслідок чого знижується температура льодоутворення. У результаті, за тієї ж температури льодистість водонасиченого бетону має бути нижчою, тож її внесок у зміну електропровідності відповідно зменшується.

Аналіз експериментальних даних показує, що за час вимірів фронт льодоутворення не досягає зони третьої електродної пари, хоча, судячи з кінетики льодоутворення, тривалість досліду для цього може бути достатньою. Зазначена обставина пояснюється, мабуть, тим, що на час закінчення вимірювань у зазначеній зоні збільшується концентрація солі, яка надходить від зволоженої грані зразка, що приводить до уповільнення процесу замерзання. Це також дає змогу зробити висновок, що характер змін електропровідності в зонах 5-ї, 6-ї та 7-ї електродних пар (рис. 3) має відображати кінетику вологоперенесення у зразках при односторонньому заморожуванні.

Дійсно, різке зростання електропровідності в перерізах 6 і 7 очевидно пов'язане зі збільшенням вмісту води і підвищенням концентрації сольового розчину. На час приходу сольової мітки до перерізу 6 температура в ньому встигає встановитися нижче, ніж у перерізі 7, що і зумовлює тут менші значення електропровідності в подальшому. У цьому інтервалі часу ще не позначається вплив сольового потоку в перерізі 5. Оскільки температура тут при цьому знижується, відбувається деяке зниження електропровідності (крива 3-а).

З рис. 3 випливає, що зміни електропровідності у відповідних перерізах водонасиченого зразка відбуваються значно повільніше, а їхня величина значно менша. Для пояснення цих особливостей необхідно врахувати, що зміна вмісту води тут може бути обумовлена лише термовологопровідністю, роль якої при високих температурах і низьких градієнтах температури в даній області зразка має бути невелика. При цьому рух сольової мітки відбувається за рахунок дифузії солі від грані зразка, що зволожується.

Отже, збільшення електропровідності в перерізі 7 пов'язано, мабуть, в основному з підвищенням концентрації солі, а зменшення електропровідності в перерізах 5 і 6 має відбуватися внаслідок зниження температури.

Зіставляючи результати вимірювань, можна зробити висновок, що середня швидкість фронту льодистості при односторонньому заморожуванні зразка цементно-піщаного розчину дослідженого складу не залежить від вихідного вмісту води і за 6 годин після початку заморожування становить 0,4 см/год. Водночас середня швидкість сольової мітки в такому зразку за такий самий проміжок часу зменшується при насиченні зразка водою, змінюючись від 0,5 см/год для зразка повітряного зберігання до 0,2 см/год для зразка, який підлягає водонасиченню протягом 48 годин.

Висновки

Показано, що в зразках бетону, які піддаються односторонньому заморожуванню (тобто знаходяться в умовах, що максимально наближені до реальних умов експлуатації в будівельних конструкціях), проходять інтенсивні процеси масоперенесення. При цьому розроблений комбінований метод незалежного вимірювання кінетики дифузії води та льодоутворення дає змогу визначити швидкості поширення фронту льодоутворення та вологопровідності залежно від складу (капілярно-пористої структури) зразків та початкових умов їх зберігання. Така інформація може дати більш достовірну картину поведінки бетону при знакозмінному температурному навантаженні в умовах різного початкового вологовмісту (у т. ч. в гідротехнічних спорудах), ніж це передбачено чинними нормативними документами. Крім того, експресність вимірювань уможливило використовувати метод для ефективного управління технологією виготовлення будівельних матеріалів із заданими властивостями.

Список літератури

1. Neville A. M., Brooks J. J. 2nd ed. Concrete technology. Harlow, England: Prentice Hall, 2010. 442 p.
2. Ramachandran V. S., Feldman R. F., Beaudoin J. J. Concrete Science: Treatise on Current Research. London: Heyden, 1981. 427 p.
3. Краснянський Г. Ю., Клапченко В. І., Азнаурян І. О. Прогнозування морозостійкості бетону за різних температур заморожування. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 53. С. 135 – 139, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139.
4. Чеховский Ю. В., Лифшиц А. В. Ускоренные методы определения морозостойкости бетона. Промышленность строительных материалов. Москва, 1986. Серия 3. Выпуск 1. 45 с.
5. Powers T. C., Helmuth R. A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. *Proc. Highw. Res. Board*. 1953. V.32. С. 285 – 297.

6. Краснянский Г. Е., Азнаурян И. А., Кучерова Г. В. Методика электрофизических исследований бетона на ранних стадиях твердения. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 50, С. 310 – 315. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2013_50_45.
7. Фельдман Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск : Изд-е «Наука» сиб. отд-е. 1988. 257 с.
8. Fen-Chong T. Freezing and thawing porous media – experimental study with dielectric capacitive method. *Comptes Rendus Mecanique*. 2005. Vol. 333. P.405 – 430.
9. Александровский С. В., Александровский В. С. Базовая математическая модель теории промерзания влажных пористых тел. *Бетон и железобетон*, 2005, № 6, С. 20 – 22.
10. Бернацкий А. Ф. Электроизоляционный бетон (технология, свойства, конструкции): монография. Новосиб. гос. ун-т архитектуры, дизайна и искусств. Новосибирск. 2016. 184 с.
11. Клапченко В. И., Краснянский Г. Е., Азнаурян И. А. Электрофизические исследования строительных материалов: монография. Киев. 2002. 84 с.

Стаття надійшла до редколегії 12.05.2023

Krasnianskyi Grygorii

PhD (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2421-1270>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Klapchenko Vasily

PhD (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-4093-5500>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Aznauryan Iryna

Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7085-7291>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

EVALUATION OF THE FROST RESISTANCE OF CONCRETE UNDER A SIGN-ALTERNATE TEMPERATURE LOAD

Abstract. One of the most important characteristics of building materials is their frost resistance. At the same time, the standard method for determining it, based on fixing the number of cycles of alternate freezing and thawing, does not always meet the requirements for the production of building materials, in particular those for the durability of buildings and structures, and has a number of significant drawbacks. A detailed comparison of the results of laboratory tests of concrete frost resistance and service life in real structures does not allow, in the general case, to establish a direct correspondence between them. In this regard, studies devoted to the development of accelerated methods for determining frost resistance are becoming extremely relevant. New methods should eliminate the main difficulty of this problem, which is the discrepancy between the conditions of laboratory studies and the real conditions in which this material is located in the constructions and buildings in operation. To obtain information about the frost resistance of concrete under real operating conditions, a combined conductometric method for independent measurement of the kinetics of moisture diffusion and ice formation in the process of one-sided freezing of samples is proposed. It is shown that in concrete samples that are subjected to one-sided freezing, that is, they are in conditions as close as possible to the actual operating conditions in building structures, intense mass transfer processes take place. The rates of propagation of the front of ice formation and diffusion of moisture and the corresponding depth of freezing of concrete samples depending on the capillary-porous structure and initial storage conditions are established. In general, the conducted studies made it possible to obtain a more reliable picture of the behaviour of concrete under sign-alternating temperature loads and conditions of different initial moisture content (including in hydraulic structures) than is provided for by the current regulatory documents. The rapidity of measurements makes it possible to use the proposed method for assessing the frost resistance of materials with one-sided freezing under real operating conditions and to effectively control the technology for manufacturing building materials with desired properties.

Keywords: frost resistance; construction materials; concrete; conductometric method; moisture diffusion kinetics; ice formation; one-sided freezing of samples; sign-alternating temperature load; technology management

References

1. Neville, A. M. and Brooks, J. J. (2010). Concrete Technology. Published Harlow, England: Prentice Hall, 442.
2. Ramachandran, V. S., Feldman, R. F. and Beaudoin, J. J. (1981). Concrete Science: Treatise on Current Research. London: Heyden, 427.
3. Krasnianskyi, Grygorii, Klapchenko, Vasily & Aznauryan, Iryna. (2023). Prediction of frost resistance of concrete at different freezing temperatures. *Management of Development of Complex Systems*, 53, 135–139, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139).

4. Chekhovskiy, Yu. V., Lifshits, A. V. (1986). Accelerated methods for determining the frost resistance of concrete. *Industry of building materials*, 3, 1, 45.
5. Powers, T. C. and Helmuth, R. A. (1953). Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. *Proc. Highw. Res. Board*, 32, 285-297.
6. Krasnianskiy, G. E. Aznauryan, I. A. & Kucherova G. V. (2019). Technique of electrophysical researches of concrete at early stages of hardening. *Urban development and spatial planning*, 50, 310–315.
7. Feldman, G. M. (1988). Movement of moisture in thawed and freezing soils. N-sk: Publishing House "Nauka" Sib. Department, 257.
8. Fen-Chong, T. (2005). Freezing and thawing porous media – experimental study with dielectric capacitive method. *Comptes Rendus Mecanique*, 333, 405–430.
9. Alexandrovsky, S. V., Aleksandrovsky, V. S. (2005). Basic mathematical model of the theory of freezing of wet porous bodies. *Concrete and reinforced concrete*, 6, 20-22.
10. Bernatsky, A. F. (2013). Electrical insulating concrete (technology, properties, constructions): Monograph. Novosib. state University of Architecture, Design and Arts. Novosibirsk, 184.
11. Klapchenko, V. I., Krasnianskiy, G. E. & Aznauryan I. A. (2002). Electrophysical studies of building materials: Monograph. Kyiv, 84.

Посилання на публікацію

- APA Krasnianskiy, Grygorii, Klapchenko, Vasily & Aznaurian, Iryna. (2023). Evaluation of the frost resistance of concrete under a sign-alternate temperature load. *Management of Development of Complex Systems*, 54, 138–143, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.138-143.
- ДСТУ Краснянський Г. Ю., Клапченко В. І., Азнаурян І. О. Оцінка морозостійкості бетону при знакозмінному температурному навантаженні. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 54. С. 138 – 143, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.138-143.