

DOI: 10.32347/2412-9933.2023.53.135-139

УДК 539.2; 541.1; 542.269

**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

## ПРОГНОЗУВАННЯ МОРОЗОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ ЗА РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУР ЗАМОРОЖУВАННЯ

**Анотація.** Стандартний метод визначення морозостійкості будівельних матеріалів, який базується на фіксації числа циклів поперемінного заморожування та відтавання, не завжди відповідає вимогам виробництва будівельних матеріалів, зокрема таким, висуваються до довговічності будівель і споруд, та має низку істотних недоліків. Прямий вимір морозостійкості матеріалів у циклах потребує спеціального обладнання і великих витрат часу (до кількох місяців), що не дає змоги ефективно керувати технологічним процесом виготовлення будівельних матеріалів із заданою морозостійкістю. Крім того, існує невідповідність умов лабораторних досліджень тим умовам, в яких перебуває конкретний матеріал у реальних конструкціях та спорудах. Максимальні негативні температури, за яких експлуатуються будівельні конструкції, зазвичай відрізняються від температури  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , за якою проводяться випробування відповідно до чинного стандарту. У статті запропоновано методику оцінювання морозостійкості бетону за реальних температур експлуатації на основі результатів вимірювань за температур, що регламентуються чинними стандартами. Морозостійкість оцінювали, визначаючи кількість води, що замерзає за різних температур, за допомогою вимірних ізобар адсорбції та отриманого співвідношення між температурою замерзання води в порах бетону і відносною вологістю. Зіставлення розрахованих значень морозостійкості бетону з одержаними на підставі прямих вимірювань засвідчило адекватність моделі, що покладена в основу розрахунку. Запропонований експериментально-аналітичний спосіб прогнозування морозостійкості бетону за різних температур заморожування уможливорює за невеликих витрат часу отримати більш повну інформацію про поведінку матеріалу на морозі, ніж передбачено наявними методиками. Аналіз залежності морозостійкості від температури дає можливість виявити області температур, де вона змінюється найбільш сильно, і зсувати за необхідності ці області у бік більш низьких або високих температур, а отже, управляти складом і технологією виробництва бетону для забезпечення необхідних характеристик матеріалу.

**Ключові слова:** прогнозування; морозостійкість; будівельні матеріали; бетон; цикли заморожування та відтавання; ізобари адсорбції; температура замерзання; відносна вологість; рівноважний вологовміст

### Вступ

Морозостійкість будівельних матеріалів визначається чинними нормативними документами, в основі яких лежить стандартний метод фіксації кількості циклів всебічного заморожування та відтавання для спеціально виготовлених зразків, які не втратили експлуатаційних властивостей під час випробувань. Однак такий підхід не завжди відповідає вимогам виробництва будівельних матеріалів і має низку істотних недоліків.

Головна проблема полягає у невідповідності умов лабораторних досліджень тим умовам, в яких перебуває конкретний матеріал у реальних конструкціях та спорудах. Максимальні негативні температури, за яких експлуатуються конструкції, зазвичай відрізняються від температури  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , за якою проводяться випробування відповідно до чинного стандарту. Сучасні уявлення про механізми морозного руйнування бетону базуються на роботах Пауерса [1; 2]. Очевидно, що однією з головних причин пошкоджень бетону при заморожуванні

є розширення води, що міститься в порах, при її переході в лід. Пауерс припустив [3; 4], що напруження, які призводять до деструкції, може викликати також гідравлічний тиск, що виникає при переміщенні води з областей, що заморожуються.

Переохолоджена рідина в гелевих порах має більшу вільну енергію порівняно з льодом у капілярах. У результаті відбувається її перенесення в капіляри зі зростанням в них об'єму льоду, що призводить до додаткових внутрішніх напружень у бетоні. Крім того, через відмінність у концентрації солей, що викликана заморожуванням води у великих порах, виникає осмотичний тиск, якій також призводить до пошкоджень бетону.

Оскільки першопричиною механізмів морозного руйнування бетону є все-таки розширення води при її переході в лід, можна очікувати, що морозостійкість матеріалу (F), виражена числом циклів, при зміні максимальної температури заморожування має бути обернено пропорційна об'єму замерзлої води в матеріалі за цієї максимальної температури. Це узгоджується також із відомими напівемпіричними кореляційними залежностями між морозостійкістю і вмістом льоду в бетоні [5].

### Мета роботи

Метою роботи є розроблення методики прогнозування морозостійкості бетону за реальних температур експлуатації, яка б уможливила за невеликих витрат часу отримувати більш повну інформацію про поведінку матеріалу на морозі, ніж передбачено наявними стандартами, оцінювати величини морозостійкості і управляти складом і технологією виробництва бетону для забезпечення необхідних характеристик матеріалу.

### Виклад основного матеріалу

#### Методика експерименту

Експериментальну перевірку запропонованого способу оцінювання морозостійкості бетону за різних температур заморожування проводили на зразках керамзитобетону. Для приготування зразків використовували цемент СЕМ І 42,5 N згідно з ДСТУ Б EN 197-1:2015, керамзит за ДСТУ Б В. 2.7-17 та пісок кварцовий за ДСТУ Б В.2.7-32-95. Для визначення морозостійкості зразки керамзитобетону готували згідно з ДСТУ Б В. 2.7-214:2009 та ДСТУ Б В. 2.7-18-95.

Розміри зразків становили 100x100x100 мм. Виготовляли три серії зразків різної густини кількістю шість штук у кожній. У серії 1 –  $\rho_1 = 1450 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , у серії 2 –  $\rho_2 = 1650 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , у серії 3 –  $\rho_3 = 1960 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Вимірювання морозостійкості проводили згідно з ДСТУ Б В. 2.7-47-96. Відповідно до стандарту

морозостійкість бетону дорівнює певному числу циклів заморожування-відтавання водонасичених зразків, після яких міцність бетону на стиск зменшується не більше ніж на 15%, а втрата маси зразка не перевищує 5%. Метод визначення морозостійкості включає циклічне заморожування зразків на повітрі з температурою мінус  $18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  тривалістю не менше 4-х годин, а потім відтавання під водою за кімнатної температури тривалістю не менше 4-х годин. Для дослідницьких цілей вимірювання морозостійкості проводили також за відмінних від стандартної температурах з діапазону від  $-5$  до  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  (таблиця).

Вимірювання рівноважних водоутримувальних характеристик експериментальних зразків керамзитобетону проводили за відомою методикою визначення ізобар адсорбції [6].

Для цього подрібнені зразки бетону за температури  $t_1$  продували повітрям, насиченим водяною парою за більш низької температури  $t_2$ . Відносна вологість  $\varphi$ , за якої перебували зразки, розраховувалася за формулою:

$$\varphi = \frac{p_s(t_2)}{p_s(t_1)}, \quad (1)$$

у якій  $p_s(t_1)$ ,  $p_s(t_2)$  – тиск насиченої водяної пари за температур  $t_1$  і  $t_2$ , відповідно.

Рівноважний вологовміст зразків  $U_\varphi$  розраховували за їх масами, що вимірювались ваговим методом:

$$U_\varphi = \frac{m_\varphi - m_0}{m_0}, \quad (2)$$

де  $m_\varphi$  – маса зразка, що перебувала в рівновазі з повітрям відносної вологості  $\varphi$ ;  $m_0$  – суха маса.

Максимальний вологовміст  $U_m$  зразків розраховували, як відносну кількість вологи, поглиненої пористим матеріалом при його контакті з водою, по відношенню до сухої маси  $m_0$  матеріалу:

$$U_m = \frac{m_s - m_0}{m_0}, \quad (3)$$

де  $m_s$  – маса водонасиченого зразка.

#### Результати та їх обговорення

У роботі морозостійкість бетону за різних температур заморожування оцінювали експериментально-аналітичним методом, який базується на припущенні, що морозостійкість F, виражена в кількості циклів, має бути обернено пропорційною об'єму замерзлої води за цієї температури:

$$F(t_2) = F(t_1) \times \frac{V(t_1)}{V(t_2)}, \quad (4)$$

де  $V(t_1)$  та  $V(t_2)$  – об'єми замерзлої води за максимальних температур заморожування  $t_1$  та  $t_2$ .

Таблиця – Експериментальні та розраховані значення морозостійкості зразків керамзитобетону за різних температур заморозування

t, °C	F, цикли – середні значення					
	серія 1 (U <sub>m</sub> =3,02%)		серія 2 (U <sub>m</sub> =4,12%)		серія 3 (U <sub>m</sub> =6,55%)	
	експ.	роз.	експ.	роз.	експ.	роз.
-5		49	78	77		123
-10	36	32	59	55	98	90
-18	23	-	41	-	75	-
-35		17	34	32		60
-40		16	25	30		57

Кількість води, що замерзла за різних температур, однозначно визначається термодинамічними характеристиками її зв'язку в матеріалі. Необхідні для обчислення V(t) дані найпростіше розрахувати за ізобарами адсорбції парів води. Ізобара враховує зниження температури замерзання води як за рахунок кривизни меніска води в порах, так і за рахунок розчинених електролітів. Тому немає необхідності вводити будь-які поправки на зміну температури замерзання порового розчину (за невеликої його концентрації). Крім того, ізотерму або ізобару адсорбції можна вимірювати за будь-якої температури, наприклад, за кімнатної, оскільки хімічний потенціал зв'язку води, що визначає зниження температури замерзання, практично не залежить від температури, за якої вимірюється ізобара адсорбції. Виміряні ізобари адсорбції парів води наведено на рис. 1.

Об'єм замерзлої води зростає зі зростанням негативної температури, хоча і монотонно, але різко нелінійно, оскільки сама ізобара адсорбції, як правило, нелінійна. Тому зміна морозостійкості в різних температурних інтервалах може бути суттєво різною.

Оскільки ізобара, як правило, задана графічно (вимірюється в експерименті), то записати формулу для розрахунку морозостійкості за різних температур у загальному вигляді неможливо. Розрахунок доводиться вести послідовно визначаючи кількість замерзлої води та відповідну морозостійкість.

Оцінювання морозостійкості проводили за такою схемою. Спочатку за даними сорбційних вимірювань визначали відношення об'ємів води, що замерзає в зразку за деяких температур t:

$$\frac{V(t_1)}{V(t_2)} = \frac{U_m - U_{\phi 1}}{U_m - U_{\phi 2}} \quad (5)$$

При цьому вираз для відносної вологості φ, що відповідає даній температурі замерзання води в порах матеріалу, можна отримати з рівняння Гіббса – Томсона.

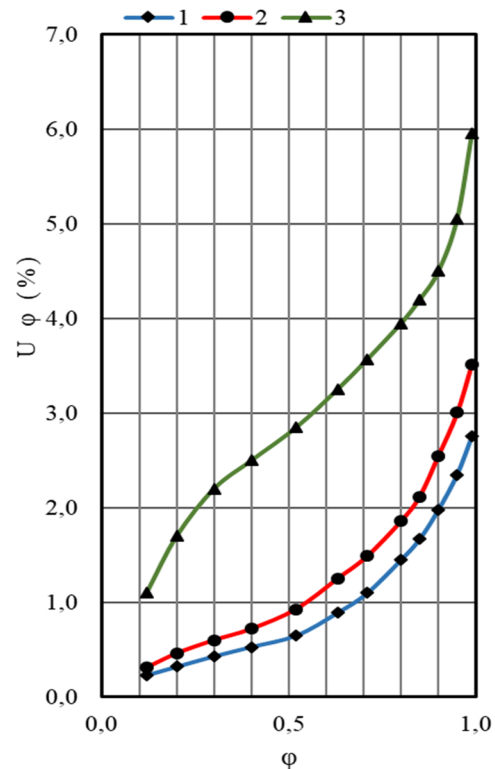


Рисунок 1 – Ізобари адсорбції зразків керамзитобетону (нумерація кривих відповідає таблиці); точки – експериментальні значення; лінії – розраховані значення

У разі напівсферичної границі поділу між льодом і рідиною, що не змочує, яка перебуває в порі радіуса r, рівняння Гіббса – Томсона для зменшення температури замерзання можна записати у вигляді [7; 8]:

$$\Delta T = T_{\infty} - T = -T_{\infty} \times \frac{2\sigma_{ll} \times \cos\theta}{\Delta H_m \times r \times \rho_l} \quad (6)$$

де T – абсолютна температура плавлення льоду в порі радіуса r; T<sub>∞</sub> – Температура плавлення вільного льоду; σ<sub>ll</sub> – питома поверхнева енергія на границі лід – рідина; ΔH<sub>m</sub> – питома ентальпія плавлення; ρ<sub>l</sub> – густина льоду; θ – крайовий кут (зазвичай вважається θ = 180°).

Тоді, використовуючи рівняння Оствальда – Фрейндліха:

$$\ln\phi = \frac{2\sigma \times V_{\mu}}{RT \times r} \quad (7)$$

де σ – поверхневий натяг рідини; μ – молярний об'єм; R – газова стала.

Для величини відносної вологості φ, за якої абсолютна температура замерзання дорівнює T, отримуємо:

$$\phi = \exp\left[\left(\frac{1}{T_{\infty}} - \frac{1}{T}\right) \times \frac{L \times \mu}{R}\right] \quad (8)$$

де μ – молярна маса води.

Залежність (8) виведена у припущенні, що  $\sigma = \sigma_{il}$  та при врахуванні  $\Delta H_m = L$ , де  $L$  – питома теплота плавлення льоду. Подібний вираз для залежності температури фазового переходу в капілярі від відносної пружності пари отримано в роботі [9] з рівняння Клаузіуса – Клапейрона.

Необхідно відмітити, що при виведенні (8) враховувалося, що температура замерзання рідини розраховується у вологонасиченому капілярно-пористому матеріалі з жорстким скелетом. Зазначимо також, що при розрахунках відносних вологостей, що відповідають певним температурам замерзання, та об'ємів замерзлої води нехтували залежністю прихованої теплоти плавлення  $L$  від температури. І хоча в дослідженому інтервалі температур  $L$  може змінюватися в межах до 20% [10], це, як показують оцінки, не вносить істотну похибку в розрахунки.

Після обчислень об'ємів води, що замерзає в зразках за заданих температур, за формулою (1) розраховували значення морозостійкості за різних температур заморожування. При цьому як базову точку обирали значення  $F$  за температури  $-18^\circ\text{C}$ , що регламентується чинним стандартом. Розрахунок проводили для всіх зразків кожної серії. Експериментальні та розраховані значення морозостійкості зразків керамзитобетону за різних температур наведено в таблиці та на рис. 2.

Значення морозостійкості, що визначені прямими вимірами і шляхом розрахунку, розрізняються для кожної серії зразків не більше, ніж експериментальні значення для кожного з шести зразків однієї серії. Ці дані підтверджують можливість використання запропонованого способу оцінювання морозостійкості бетону за різних температур заморожування і відповідно справедливості покладеної в основу розрахунку моделі. Більше того, вони свідчать про те, що в дослідженому температурному інтервалі від  $0$  до  $-40^\circ\text{C}$  превалює, мабуть, один і той самий механізм морозного руйнування.

На основі даних проведених досліджень можна розраховувати морозостійкість бетонів та інших

будівельних матеріалів за будь-якої температури, використовуючи результати вимірювань за  $-18^\circ\text{C}$ . Такий розрахунок дає змогу суттєво економити час і витрати порівняно з прямим експериментом.

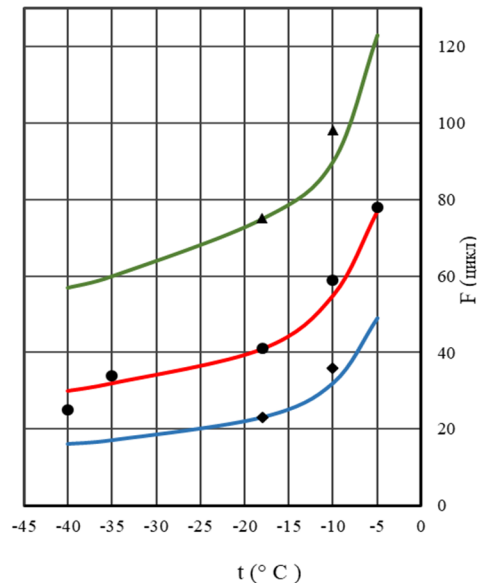


Рисунок 2 – Залежність морозостійкості зразків керамзитобетону від температури заморожування (нумерація кривих відповідає таблиці): точки – експериментальні значення; лінії – розраховані значення

## Висновки

Пропонований експериментально-аналітичний спосіб прогнозування морозостійкості бетону за різних температур заморожування дає змогу за невеликих витрат часу отримати більш повну інформацію про поведінку матеріалу на морозі, ніж передбачено наявними методиками. Завдяки аналізу залежності морозостійкості від температури є можливість виявити області температур, у яких вона змінюється найбільше, і зсувати, за необхідності, ці області в бік більш низьких або високих температур за рахунок коригування складу і технології виробництва бетону.

## Список літератури

1. Ramachandran V. S., Feldman R. F., Beaudoin J. J. Concrete Science: Treatise on Current Research. London: Heyden, 1981. 427 p.
2. Neville A. M., Brooks J. J 2nd ed. Concrete technology. Published Harlow, England, 2010. 442 p.
3. Powers T.C. Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. *Proc. Am. Concrete Inst.* V41. 1945. P. 245–272.
4. Powers T. C., Helmuth R. A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. *Proc. Highw. Res. Board.* V32. 1953. P. 285–297.
5. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi – Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, Inc. New York, 2013. 223p.
6. Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, Surface Area and Porosity. London: Academic Press. 1982. 313 p.
7. Jackson C. L., McKenna G. B. The melting behavior of organic materials confined in porous solids. *J. Chem. Phys.* V93(12). Dec. 1990. P. 9002–9011. <https://doi.org/10.1063/1.459240>.
8. Webber J. B. W., Studies of nano-structured liquids in confined geometries and at surfaces. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.* V56. 2010. P. 78–93. doi:10.1016/j.pnmrs.2009.09.001, PMID 20633349.

9. Красильников К. Г., Никитина Л. В., Скоблинская Н. Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. Москва : Стройиздат: 1980. 256 с.

10. Feistel R., Wagner W., A new equation of state for H<sub>2</sub>O ice. *Ih, Journal of Physical Chemistry Reference Data*. V35. 2006. P. 1021-1047.

Стаття надійшла до редколегії 02.03.2023

### **Krasnianskyi Grygorii**

Doctor of Philosophy, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2421-1270>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### **Klapchenko Vasily**

Doctor of Philosophy, 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

## **PREDICTION OF FROST RESISTANCE OF CONCRETE AT DIFFERENT FREEZING TEMPERATURES**

**Abstract.** The article proposes a method for evaluating the frost resistance of concrete at actual operating temperatures, using measurement results at temperatures that are regulated by current standards. Frost resistance was evaluated by determining the amount of water freezing at different temperatures, based on the measured adsorption isobars and the obtained relationship between the freezing temperature of water in concrete pores and relative humidity. A comparison of the calculated values of the frost resistance of concrete with those got based on direct measurements showed the adequacy of the calculation model. The proposed experimental-analytical method for evaluating the frost resistance of concrete at different freezing temperatures allows in a small amount of time to get more complete information about the behavior of the material in frosty weather under real operating conditions than is provided for by existing methods. An analysis of the dependence of frost resistance on temperature also makes it possible to identify the temperature regions where it changes most strongly, and to shift, if necessary, these regions to lower or higher temperatures due to the change of the composition and technology of concrete production.

**Keywords:** prediction; frost resistance; concrete; adsorption isobars; freezing temperature; relative humidity; equilibrium moisture content

### **References**

1. Ramachandran, V. S., Feldman, R. F, and Beaudoin, J. J. (1981). Concrete Science: Treatise on Current Research. London: Heyden, 427.
2. Neville, A. M., and Brooks, J. J., 2nd ed. (2010). Concrete Technology. Published Harlow, England: Prentice Hall, 442.
3. Powers, T. C. (1945). Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. *Proc. Am. Concrete Inst.*, 41, 245–272.
4. 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.
5. Dvorkin, L., Dvorkin, O., and Ribakov, Yu. (2013). Multi – Parametric Concrete Compositions Design. New York: Nova Science Publishers Inc., 223.
6. Gregg, S. J., and Sing, K. S. W. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. *London: Academic Press.*, 313.
7. Jackson, C. L., and McKenna, G. B. (1990). The melting behaviour of organic materials confined in porous solids. *J. Chem. Phys.*, 93, 9002–9011.
8. Webber, J. B. W. (2010). Studies of nano-structured liquids in confined geometries and at surfaces. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 56, 78–93.
9. Krasilnikov, K. G., Nikitina, L. V., and Skoblinskaya, N. N. (1980). Physico-chemistry of Own Deformations of Cement Stone. Moscow: Stroyizdat, 256.
10. Feistel, R., and Wagner, W. (2006). A new equation of state for H<sub>2</sub>O ice. *Ih J. of Phys. Chem. Reference Data*, 35, 1021–1047.

### **Посилання на публікацію**

APA Krasnianskyi, Grygorii, Klapchenko, Vasily & Aznaurian, Iryna. (2022). 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).

ДСТУ Краснянський Г. Ю., Клапченко В. І., Азнаурян І. О. Прогнозування морозостійкості бетону за різних температур заморозування. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 53. С. 135 – 139, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139).