

УДК 666.972.53

**С. Г. НИКОЛЬСКИЙ, О. Н. ПЕРЦЕВА**

Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

## **УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористого материала, в том числе и бетонных образцов, путем повышения информативности их испытания. В данном исследовании предложен и обоснован новый ускоренный метод определения пористых материалов. Предложенная технология измерения морозостойкости пористых материалов основана на зависимости энергии разрушения, выделенной после механического сжатия образцов, и энергии, выделяемой после термоциклирования. Для проверки корректности способа были испытаны образцы в возрасте 88 суток. Испытания проводились по новому предложенному методу и по базовому методу определения морозостойкости. Расхождение результатов с базовым методом составило 5,3 %, что доказывает корректность способа и возможность внедрения его в более широкое практическое использование.

**бетон, морозостойкость, дилатометрический метод, экспресс-метод, термоциклирование, неразрушающий метод**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время при производстве цементных бетонов всё чаще используются различные химические добавки. Следовательно, свойства бетона и бетонной смеси зависят не только от таких базовых параметров, как вид цемента [1], вид заполнителя, водоцементное отношение и т. д., но и от наличия и вида добавок [2]. Их использование позволяет улучшить необходимые свойства бетонных смесей и бетонов [3], в частности удобоукладываемость, прочность, водонепроницаемость, морозостойкость [4]. Таким образом, для облегчения внедрения новых технологий в сферу производства бетонов необходимо максимально упростить процесс лабораторных испытаний его свойств [5]. Так, например, доказано, что прямые и косвенные способы определения прочности бетона дают схожие результаты [6], а использование косвенных методов во многом упрощает нахождение его основных параметров. Однако для определения морозостойкости бетона оказывается недостаточной замена прямого способа определения прочности косвенным, поскольку согласно базовому методу до этого образцы необходимо подвергать многократному попеременному замораживанию и оттаиванию. Следовательно, необходима разработка нового ускоренного метода проведения лабораторных испытаний для оценки морозостойкости различных естественных и искусственных камней, а также других пористых материалов.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Под показателем морозостойкости бетона подразумевают [7] число циклов замораживания до  $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$  насыщенных образцов камня и оттаивания при  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  (стандартных термоциклов), необходимых для снижения исходного предела прочности камня на величину  $\delta R$ . Например, для тяжелых бетонов допустимое стандартное снижение  $[\delta R/R]$  составляет 0,1, а для легких бетонов – 0,15 [8]. Значительный разброс значений предела прочности образцов бетона (коэффициент вариации  $\rho \approx 17\%$  [8]) при неизменных условиях их изготовления и испытаний обуславливает случайный разброс выбора средних значений  $R$  в пределах  $\Delta R/R = \pm \rho \sqrt{n}$ , где  $n$  – объем выборки образцов. При этом для доказательства значимости относительного снижения  $R$  на 0,10...0,15 приходится испытывать до 50 образцов, обеспечивая  $\Delta R = 0,068R$  при доверительной вероятности 0,95. Таким образом, основной

недостаток базового способа – трудоемкость и малая оперативность, так как продолжительность стандартного термоцикла не менее 4,5 часов [9], а  $F \gg 50$ . Европейские стандарты [10] определения морозостойкости бетонов несколько отличаются от Российских [11], однако они также являются недостаточно оперативными и трудоёмкими [12].

Помимо базовых способов, существуют экспресс-методы, которые значительно упрощают определение морозостойкости, но при этом обладают другими существенными недостатками [13]. Так, например, dilatометрический экспресс-метод определения морозостойкости [14], который является прототипом описываемого метода, приемлем только для портландцементного и шлакопортландцементного бетона без добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ). Ограничен в области применения и метод с использованием планшетного сканера [15].

## ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей проекта является обоснование универсального экспресс-метода определения марки морозостойкости естественных и искусственных камней (кирпича, бетона) с помощью оценки длительной прочности неразрушающим методом.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Изобретение относится к методам испытаний пористых водонасыщенных тел и предназначено для определения марки бетона по морозостойкости.

Решение задачи достигают тем, что, как и в прототипе, изготавливают серию образцов из одной бетонной смеси, образцы насыщают водой, замораживают до нормативной температуры. Но в отличие от прототипа предварительно неразрушающим методом, например [16], определяют предел длительной прочности каждого образца в условиях растяжения. Далее образцы размораживают и устанавливают относительную остаточную деформацию каждого образца и по значениям относительной остаточной деформации образца и предела длительной прочности образца в условиях растяжения определяют удельную энергию, рассеянную в единице объема образца в процессе замораживания-размораживания. Затем нагружают каждый образец в условиях одноосного сжатия до экстремальной нагрузки, отвечающей кратковременному пределу прочности, при этом регистрируя значения осевой нагрузки и соответствующие им продольные деформации каждого образца. По полученным значениям осевой нагрузки и соответствующих им продольных деформаций определяют удельную энергию, рассеянную в единице объема образца в процессе его сжатия до экстремальной нагрузки, и находят значение марки каждого бетонного образца по морозостойкости.

Энергию, рассеянную в единице объема материала в процессе замораживания-размораживания, рассчитывают по формуле:

$$W_{\text{тц}} = k \theta_{\text{ост}} \cdot R_{\text{дл}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{тц}}$  – удельная энергия образца, рассеянная в процессе замораживания-размораживания;  
 $\theta_{\text{ост}}$  – относительная остаточная деформация образца;  
 $R_{\text{дл}}$  – предел длительной прочности образца в условиях растяжения;  
 $k$  – коэффициент пропорциональности.

Значение энергии, рассеянной в единице объема образца в процессе его сжатия до экстремальной нагрузки, пропорционально квадрату кратковременного предела прочности [17]:

$$W_{\text{сж}} = \alpha R^2, \quad (2)$$

где  $W_{\text{сж}}$  – энергия, рассеянная в единице объема образца в процессе его сжатия до экстремальной нагрузки;  
 $R$  – кратковременный предел прочности;  
 $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

Марку по морозостойкости для конкретного образца  $F_{\text{обр}}$  рассчитывают по формуле:

$$F_{\text{обр}} = 2 [\Delta R / R] W_{\text{сж}} / W_{\text{тц}}, \quad (3)$$

В частности, способ был реализован на 10 образцах-кубах, ребром 10 см в возрасте 88 суток, изготовленных из бетонной смеси такого состава: портландцемент марки 400 – 1 в. ч., песок – 2 в. ч., гранитного щебня фракции 5...20 мм – 4,5 в. ч., воды – 0,6 в. ч. Экспериментально установлено двумя

разными способами для этого бетона в возрасте 88 суток, что после 105 циклов замораживания-оттаивания, соответствующих марке этого бетона по морозостойкости, среднее относительное снижение предела прочности составляет 0,142 по способу [18] и 0,16 по первому базовому способу [7], то есть оба значения лежат в пределах погрешности использованных способов. В среднем относительное снижение предела прочности составляет 15 %.

Среднее квадратичное отклонение значений  $F_{15i}$  ( $F_{15i}$  – марка i-го бетонного образца по морозостойкости при снижении предела его прочности на 15 %, полученная предлагаемым способом; где i от 1 до 10), оказалось равным 16. С учетом этого расхождение среднего значения марки по морозостойкости бетона  $\overline{F_{15}} = 99,7$  и ранее экспериментально найденного числа циклов 105 (марка  $F_{15}$ ), необходимых для снижения R на 15 %, можно считать случайным, а предложенный способ корректным (таблица).

**Таблица** – Результаты испытаний образцов по предложенному методу

№	$\overline{R}_{дл}$ , МПа	$\theta_{ост} \cdot 10^4$	$W_{тц} \cdot 10^4$ , МПа	$W_{ск} \cdot 10$ , МПа	$[\Delta W] \cdot 10^2$ , МПа	$F_{15i}$
1	1,5	2,7	4,05	0,9990	2,997	74
2	1,7	3,1	5,27	1,7215	5,165	98
3	1,8	1,8	3,24	1,2312	3,694	114
4	1,9	2,6	4,90	1,6796	5,039	102
5	2,0	2,5	5,00	1,4333	4,300	86
6	2,1	1,9	4,00	1,4364	4,309	108
7	2,2	2,6	5,72	2,2308	6,692	117
8	2,3	2,1	4,83	1,3846	4,154	86
9	2,9	1,8	5,22	1,6008	4,802	92
10	3,1	1,5	4,65	1,8600	0,558	120
Среднее	2,15	2,1	4,69	1,5577		99,7

## ВЫВОДЫ

Предложенный способ расширяет арсенал технических средств ускоренного определения марки бетона по морозостойкости. Длительность определения морозостойкости обуславливается по сути временем насыщения образца водой (4 дня по п.4 ГОСТ 10060.0 «Методы определения морозостойкости. Общие требования»). По результатам исследования был получен патент на изобретение [19]. В дальнейшем планируется проверить корректность предлагаемого метода для инновационных типов бетонов, например для высокопрочного бетона, самоуплотняющегося или текстильно армированных бетонов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The cement type effect on freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete [Текст] / G. Skripkiunas, D. Nagrockiene, G. Girskas, M. Vaičiene, E. Baranauskaite // Procedia Engineering. – 2013. – No. 57. – P. 1045–1051.
2. Influence of Plasticizing and Siliceous Additives on the Strength Characteristics of Concrete [Текст] / L. Akimov, N. Ilenko, R. Mizharev, A. Cherkashin, N. Vatin, L. Chumadova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725–726. – P. 461–468.
3. Effect of Air-Entraining Agent LHD on the Technological Properties of Concrete Mix Containing Superplasticizer S-3 [Текст] / Y. Barabanshchikov, M. Komarinskiy // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725–726. – P. 419–424.
4. Nagrockien, D. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite [Текст] / D. Nagrockien, G. Girskas, G. Skripkiunas // Construction and Building Materials. – 2014. – No. 66. – P. 45–52.
5. Kewalramani, M. A. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks [Текст] / M. A. Kewalramani, R. Gupta // Automation in Construction. – 2006. – Vol. 15, No. 3. – P. 374–379.
6. Freeze-thaw resistance testing of concrete railway sleepers [Текст] / A. Köliö, T. Rantala, J. Lahdensivu, A. Nurmikolu // Concrete Solutions : Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Concrete Repair / Michael Grantham, P A Muhammed Basheer, Bryan Magee, Marios Soutsos (Eds.). – London : Taylor & Francis Group, 2014. – P. 533–539.
7. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости [Текст]. – Взамен ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 10060.1-95, ГОСТ 10060.2-95, ГОСТ 10060.3-95, ГОСТ 10060.4-95 ; введ. 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 10 с.

8. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – Взамен ГОСТ 10180-90 ; введ. 2013-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 31 с.
9. Судаков В. Б. Пути совершенствования технологии бетона гидротехнических сооружений [Текст] / В. Б. Судаков // Гидротехнический бетон и его работа в сооружениях : [Материалы совещ., 15–17 нояб. 1983 г., Тбилиси / Ред.-изд. совет: М. Ф. Складнев (пред.) и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – С. 4–16.
10. BS EN 206:2013. Concrete. Specification, performance, production and conformity [Текст]. – Supersedes EN 206-1:2000, EN 206-9:2010 ; This European Standard was approved by CEN on 28 September 2013. – Brussels : CEN, 2013. – 98 p. – ISBN 978-0-580-85966-3.
11. Сравнительный анализ Европейской и Российской технической документации строительных материалов [Текст] / М. В. Антонова, Д. В. Глушко, С. В. Беляева, Л. Пакрастинш // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 4 (19). – С. 34–50.
12. CDF Test – Test Method for the Freeze-Thaw Resistance of concrete – tests with sodium chloride solution (CDF) [Текст] : Recommendation / Prepared by M. J. Setzer, G. Fagerlund and D. J. Janssen // Materials and Structures. 1996. Vol. 29. P. 523–528.
13. Liisma, E. Internal and external damages of concrete with poor quality of coarse limestone aggregate [Текст] / E. Liisma, L. M. Raado // CESB 13 Prague : Central Europe towards Sustainable Building 2013 : sustainable building and refurbishment for next generations / Editors: Petr Hójek, Jan Tywoniak, Antonnn Lurňlek, Jan Růžňinka, Kateřina Sojková. – Prague : Grada Publishing for Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2013. – P. 393–396.
14. Опыт экспрессного определения морозостойкости бетона транспортных сооружений [Текст] / А. В. Алексеев, А. Д. Дикун, В. Я. Фишман, В. Н. Дикун // Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 55–57.
15. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods [Текст] / M. Radlinski, J. Olek, Q. Zhang, K. Peterson // Journal of ASTM International. – 2010. – Vol. 7, No. 4. – P. 1–14.
16. Никольский, С. Г. Экспресс-методы оценки длительной стойкости бетона [Текст] / С. Г. Никольский, Т. С. Никольская // Материалы III МК «Популярное бетоноведение» / Под ред. М. Скипский. – СПб. : ООО «Стройбетон», 2009. – С. 35–44.
17. Ахвердев, И. Н. Основы физики бетона [Текст] / И. Н. Ахвердев. – Л. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
18. Никольский, С. Г. Экспресс-метод контроля эрозии бетона [Текст] / С. Г. Никольский // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 25–28.
19. Пат. 2543669 Российская Федерация, МПК G01N 33/38. Способ определения марки бетона по морозостойкости [Текст] / Никольский С. Г., Перцева О. Н. ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». – № 2013125870/28 ; заявл. 10.12.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7. – 9 с.

Получено 02.03.2016

# С. Г. НИКОЛЬСКИЙ, О. М. ПЕРЦЕВА ПРИСКОРЕНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МОРОЗОСТІЙКОСТІ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Санкт-Петербурзький політехнічний університет ім. Петра Великого

Обґрунтування експрес-методу визначення морозостійкості пористого матеріалу, у тому числі і бетонних зразків, шляхом підвищення інформативності їх випробування. У даному дослідженні запропоновано і обґрунтовано новий прискорений метод визначення пористих матеріалів. Запропонована технологія вимірювання морозостійкості пористих матеріалів заснована на залежності енергії руйнування, виділеної після механічного стиснення зразків, і енергії, що виділяється після термоциклювання. Для перевірки коректності способу були випробувані зразки у віці 88 діб. Випробування проводилися за новим запропонованим методом і за базовим методом визначення морозостійкості. Розбіжність результатів з базовим методом склала 5,3 %, що доводить коректність способу і можливість впровадження його в більш широке практичне використання.

**бетон, морозостійкість, дилатометричний метод, експрес-метод, термоциклювання, неруйнівний метод**

# SERGEY NIKOLSKIY, OLGA PERTSEVA A RAPID METHOD FOR DETERMINATION OF FROST RESISTANCE OF POROUS MATERIALS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Substantiation of Express method for determining of frost resistance of the porous material, including concrete samples by increasing the information content of their test. In this study, we proposed and validated

a new rapid method for the determination of porous materials. The technology of measurement of frost resistance of porous materials is based on the destruction of Energy, allocated after mechanical compression of the samples, and the energy released after thermocycling. To check the correctness of the method the samples were tested at the age of 88 days. The tests were conducted on the new proposed method and reference method of determining frost-resistance. The discrepancy between the results with the baseline method was 5.3 %, which proves the correctness of the method and the possibility of introducing it into wider practical use.

**concrete, frost resistance, dilatometry method, rapid method, thermal Cycling, nondestructive method**

**Нікольський Сергій Григорович** – доктор технічних наук, професор кафедри будівництва унікальних будівель і споруд Санкт-Петербурзького політехнічного університету Петра Великого. Наукові інтереси: експрес-методи контролю властивостей сировини і виробів: вологість сировини і керамічної маси, знос металевих частин обладнання, тривалої механічної та електричної міцності, тріщиностійкості, морозостійкості, ерозії, корозії, стійкості проти повзучості тощо.

**Перцева Ольга Миколаївна** – студентка Санкт-Петербурзького політехнічного університету Петра Великого. Наукові інтереси: будівельні матеріали та вироби, прискорені методи визначення міцності матеріалів.

**Никольский Сергей Григорьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Научные интересы: экспресс-методы контроля свойств сырья и изделий: влажность сырья и керамической массы, износ металлических частей оборудования, длительной механической и электрической прочности, трещиностойкости, морозостойкости, эрозии, коррозии, стойкости против ползучести и т.д.

**Перцева Ольга Николаевна** – студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Научные интересы: строительные материалы и изделия, ускоренные методы определения прочности материалов.

**Nikolskiy Sergey** – D.Sc. (Eng.), Professor, Construction of Unique Buildings and Structures Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Scientific interests: express methods of control of properties of raw materials and products: humidity of raw ceramic mass, the metal wear parts of the equipment, long mechanical and electrical strength, crack resistance, frost resistance, erosion, corrosion, resistance to creep, etc.

**Pertseva Olga** – student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Scientific interests: building materials and products, rapid methods for determining the strength of materials.