

doi: 10.5862/MCE.60.2

## Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористых материалов

### Substantiation of an express-method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials

*Д-р техн. наук, профессор С.Г. Никольский,  
студент О.Н. Перцева,  
студент В.И. Иванова,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Ключевые слова:** морозостойкость; пористые материалы; бетон; термоциклирование; остаточная деформация; предел прочности; неразрушающий метод

*S.G. Nikolskiy,  
O.N. Pertseva,  
V.I. Ivanova,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University, St. Petersburg, Russia*

**Key words:** freeze-thaw resistance; cellular material; concrete; thermal cycling; permanent set; compression resistance; nondestructive method

**Аннотация.** Известно, что существующие методы определения морозостойкости бетона и других пористых материалов обладают высокой трудоемкостью и малой оперативностью. Следовательно, необходимо создание нового ускоренного метода. В статье предложен и обоснован экспрессный метод определения морозостойкости бетона. Предложенная технология измерения морозостойкости пористых материалов основана на вычислении величины  $z$  – отношения относительного снижения предела прочности  $R$  к относительной остаточной деформации  $\varepsilon$  в направлении, перпендикулярном сжатию. Выявлено, что это отношение является постоянным для конкретного состава бетона и не зависит от значений  $R$  и  $\varepsilon$ . Также доказано, что значения не чувствительны к замене части термоциклов механическими. Указанные аспекты позволили сократить время определения морозостойкости бетонов и снизить трудоемкость проводимых испытаний. Предложенный метод был реализован на 10 бетонных образцах следующего состава: портландцемент марки 400 – 1 весовая часть, песок – 2 весовые части, гранитный щебень 5...20 мм – 4.5 весовые части, вода – 0.6 весовой части. Образцы-кубы, согласно предложенному методу, насыщали водой, обмеряли, подвергали попеременному замораживанию и оттаиванию, а также осевому сжатию до достижения экстремальных нагрузок. Затем рассчитывали морозостойкость для каждого образца и вычисляли среднее значение  $F$  выборки. Полученное значение сравнили с известным ранее значением морозостойкости для данной смеси, полученным по базовому методу. Таким образом, был обоснован новый метод ускоренного определения морозостойкости пористых материалов, который отличается повышенной оперативностью, малой трудоемкостью и экономичностью.

**Abstract.** An express method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials was offered and substantiated in this article. The proposed measurement technology of concrete frost resistance is based on the computation of the value  $z$  which is the ratio of the relative decrease of compression resistance  $R$  to the relative permanent set  $\varepsilon$  in the direction which is perpendicular to the pressure. It was found that this ratio is constant for a given composition of the concrete and does not depend on the values of  $R$  and  $\varepsilon$ . It was also proved that the values are not sensitive to the replacement of mechanical thermal cycles. These aspects will decrease the time for determining the freeze-thaw resistance of concrete and reduce the labor intensity of the tests conducted. The proposed method has been implemented on 10 samples of concrete with the following composition: Portland cement 400 (12.3 %), sand (24.7 %), granite macadam of dimensions 5...20 mm (55.6 %), water (7.4 %). Specimen cubes, according to the proposed method, were saturated with water, measured, subjected to alternate freezing and thawing and axial compression to achieve extreme loads. Then the frost resistance for each sample and the mean sample value  $F$  were calculated. The resulting value was compared with the freeze-thaw resistance, which was received for the mixture by the basic method. Thus, a new accelerated method for the determination of the freeze-thaw resistance of cellular materials was substantiated. It is highly efficient, simple, and has a low cost.

Nikolskiy S.G., Pertseva O.N., Ivanova V.I. Substantiation of an express-method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials

## Введение

Бетон – один из самых распространенных строительных материалов, его применяют для строительства гражданских и промышленных зданий, гидротехнических сооружений и дорог. На территории РФ объем реализованной бетонной смеси за период с января по август 2014 года составил 19.6 миллионов м<sup>3</sup> – по данным Федеральной службы государственной статистики РФ, это на 7 % процентов больше по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года. Широкая область применения и динамика объемов производства бетона обуславливают повышенный интерес к его основным характеристикам в сфере научных исследований.

В настоящее время при производстве цементных бетонов все чаще используются различные химические добавки, а значит, свойства бетона и бетонной смеси теперь зависят не только от таких базовых параметров, как вид цемента [1] и заполнителя, водоцементного отношения и т.д., но и от наличия и вида добавок [2]. В зависимости от назначения химические добавки делятся на группы согласно ГОСТ 24211–2008. Их использование позволяет улучшить необходимые свойства бетонов и бетонных смесей [3], будь то удобоукладываемость, прочность, водонепроницаемость или морозостойкость [4]. Однако применение новых добавок, как и использование любых новых технологий, требует предварительного проведения испытаний. 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 попаременному замораживанию и оттаиванию. Следовательно, необходимо создание нового ускоренного метода проведения лабораторных испытаний для оценки морозостойкости различных естественных и искусственных камней, а также других пористых материалов.

## Обзор литературы

Под показателем  $F$  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  $R$  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 0.1...0.15 приходится испытывать до 50 образцов, обеспечивая  $\Delta R = 0.068R$  при доверительной вероятности 0.95. Таким образом, основные недостатки базового способа – трудоемкость и малая оперативность, так как продолжительность стандартного термоцикла не менее 4.5 часов [9], а  $F > 50$ . Европейские стандарты [10] определения морозостойкости бетонов несколько отличаются от российских [11], однако они также являются недостаточно оперативными и трудоемкими [12, 13].

Помимо базовых способов существуют экспресс-методы, которые значительно упрощают определение морозостойкости, но при этом обладают другими существенными недостатками [14]. Так, например, дилатометрический экспресс-метод определения морозостойкости [15], 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 [16].

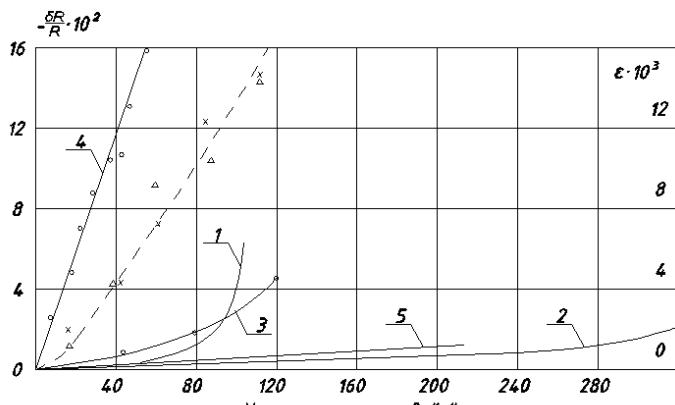
## Постановка задачи

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

## Описание метода

Целесообразно получать информацию о накоплении поврежденности  $\Pi$  материала в процессе термоциклирования при  $c \ll F$ , учитывая, например, тот факт, что экспериментальные данные связи  $\Pi$  и  $c$  хорошо аппроксимируются (рис. 1 и 2) зависимостями  $\Pi = Ac^q$ , где  $\Pi$  – мера поврежденности, в частности  $\delta R$ ;  $A = \Pi$  при  $c = 1$ ;  $q \geq 1$  – постоянная материала.

В этом случае, термоциклируя представительную выборку образцов, можно для каждого  $i$ -го образца определить неразрушающим методом значение исходного предела прочности  $R$  и  $R_c$  после числа термоциклов  $c \ll F$  с точностью  $\pm 3\%$  [17], рассчитать морозостойкости  $F_i$ , а выборочные средние  $\bar{F} = \sum F_i/n$  использовать как оценку морозостойкости  $F$  камня.



**Рисунок 1. Зависимости относительного снижения предела прочности  $\delta R/R$  и остаточной деформации  $\varepsilon$  бетона от числа термоциклов.**  
По данным [18]:  $x - \delta R/R$ ;  $\Delta - \varepsilon$ . По данным [19, рис. 24]: 1 –  $\varepsilon$  бетона без добавок; 2 –  $\varepsilon$  для бетона с добавкой ГКЖ-94; 3 и 4 –  $\varepsilon$  и  $\delta R/R$  для бетона с известняковым щебнем [19, рис. 14]; 5 –  $\varepsilon$  для раствора [19, рис. 13]

Оценим максимальные погрешности (абсолютную  $\Delta F$  и относительную  $\Delta F/F$ ) при определении  $F$  с помощью зависимости

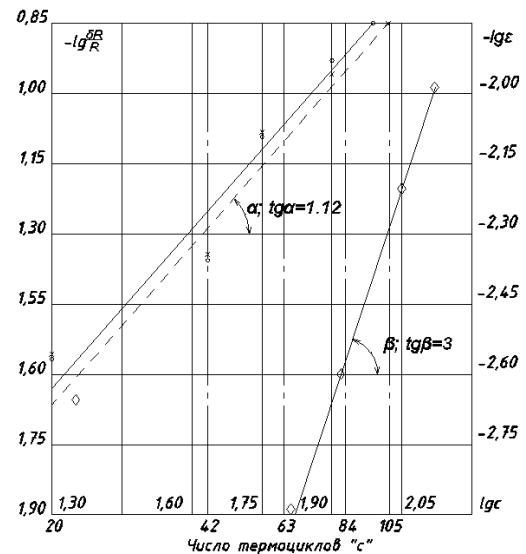
$$\delta R = A \cdot c^q, \quad (1)$$

где  $A = \delta R_1$  – снижение предела прочности в результате первого термоцикла ( $c = 1$ );

$$q = \{\ln(\delta R_c / \delta R_1)\} / (\ln c); \quad (2)$$

$\delta R_c$  – снижение  $R$  в результате  $c$  циклов.

Подставив в левую часть (1)  $[\delta R/R]R$ , а в правую –  $F$  вместо  $c$ , получаем  $[\delta R/R]R = AF^q$ . Разделив такой результат на (1), находим  $(F/c)^q = [\delta R/R]R / \delta R_c$ . Логарифмирование этого равенства дает выражение  $q \ln(F/c) = \ln[\delta R/R] + \ln R - \ln \delta R_c$ , а после дифференцирования имеем:



**Рисунок 2. Отражение в логарифмических координатах зависимостей относительного снижения предела прочности  $\delta R/R$  и остаточной деформации  $\varepsilon$  от числа термоциклов: по данным [12] • – для  $\delta R/R$ , X – для  $\varepsilon$ ; по данным [9] ◆ – для  $\varepsilon$**

$$\begin{aligned} q \frac{\Delta F}{F} + \{\ln(F/c)\} \Delta q &= \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \Rightarrow \\ \pm \frac{\Delta F}{F} - \frac{1}{q} \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right| + \{\ln(F/c)\} \left| \frac{\Delta q}{q} \right| &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta R/R$ ,  $\Delta \delta R_c/\delta R_c \gg \Delta R/R$  и  $\Delta R/R$  – максимальные относительные погрешности определения, соответственно, начального значения  $R$ , снижения  $R$  после  $c$  циклов или значения  $q$ ;  $\Delta R/R = 0.03$  при использовании неразрушающего метода, или 0.068 – при испытании выборок объемом 25 образцов;  $\Delta \delta R = 2\Delta R$ .

Таким образом,  $\Delta F/F$  обусловлена погрешностями определения прочности  $\Delta R/R + \Delta \delta R_c/\delta R_c$  с множителем  $1/q$  и погрешностью  $\Delta q/q$  с множителем  $\ln(F/c)$ . Если  $q$  действительно равно 1 ( $\Delta q = 0$ ), то из (3) получаем погрешность расчета  $F$  по зависимости  $\delta R = \delta R_1 c$  в виде:

$$\pm \frac{\Delta F}{F} = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right|, \quad (4)$$

где  $\Delta R/R \approx 0.03$ ;  $\Delta \delta R_c = 2\Delta R \approx 0.06R$ ;  $\Delta R_c \leq [\delta R/R] = (0.05...0.15)R$ . Следовательно, при контроле  $F$  по  $\delta R$  и справедливости линейной аппроксимации, даже при достижении значения  $[\delta R/R]$ , погрешность  $\Delta F/F$  может превышать 120 % и, чтобы снизить ее хотя бы до 15 %, необходимо довести  $\delta R_c$  до  $0.5\delta R = 10[\delta R/R]$  или испытать более 64 образцов до  $[\delta R/R]$  при использовании неразрушающего контроля  $\delta R$ .

Дифференцирование (2) дает:

$$\begin{aligned} \Delta q &= \frac{1}{\ln c} \left\{ \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} + \frac{\Delta \delta R_1}{\delta R_1} \right\} \\ \frac{\Delta q}{q} &= \frac{1}{\ln(\delta R_c / \delta R_1)} \left\{ \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} + \frac{\Delta \delta R_1}{\delta R_1} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta \delta R_c = \Delta \delta R_1 = 2\Delta R$ ;  $\delta R_c = \delta R_1 c^q$ ;  $\Delta \delta R_1 / \delta R_1 \gg \Delta R/R$ .

Подставив (5) в (3), получаем:

$$\begin{aligned} \pm \frac{\Delta F}{F} &= \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right| + \left( \ln \frac{F}{c} \right) \left( \frac{1+c^q}{\ln c} \right) \left( \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right) \right\} \\ \frac{\Delta F}{F} &\approx \frac{1}{q} \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \left\{ 1 + \left( \ln \frac{F}{c} \right) \left( \frac{1+c^q}{\ln c} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Множитель  $\frac{1+c^q}{\ln c}$  при  $q=1$  имеет минимум, когда  $c=4$ , и численно равен 3.6.

При  $F=40$  и  $c=4$   $\ln(F/c)=2,3$ ;  $\left( \ln \frac{F}{c} \right) \left( \frac{1+c^q}{\ln c} \right) \approx 8,3$ , а  $\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{9,3}{q} \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c}$ . Так как

$\Delta \delta R_c = \delta R_c$  (при малых  $c$ ), то  $\Delta F/F \approx 9,3/q$ . Этот результат доказывает, что при

использовании  $\delta R$  в качестве  $\Pi$  вклад погрешности определения  $q$  в  $\Delta F/F$  минимум в 8 раз больше вклада погрешностей определения  $R$ . Следовательно, уменьшения  $\Delta F/F$  целесообразно добиваться уменьшением  $\Delta q$  – см. (3).

Решить эту задачу можно, в частности, измеряя в процессе термоциклирования параллельно с  $\delta R$  другую характеристику поврежденности материала со значительно меньшей относительной погрешностью – например, относительную остаточную деформацию  $\varepsilon = \delta l/l$ , где  $l \approx 100$  мм – длина базы, на которой измеряют эту деформацию;  $\delta l = l_c - l$  – абсолютная деформация на заданной базе;  $l_c$  – длина базы после  $c$  термоциклов.

При измерении базы образца с помощью инструментального микроскопа или измерительной скобы с индикатором часового типа (точность 1 мкм) погрешность  $\Delta l/l$  можно свести к  $10^{-5}$ . У бетонов  $\varepsilon$  после первых термоциклов превышает  $2 \cdot 10^{-3}$ . Так как  $\ln \varepsilon = \ln \delta l - \ln l_c$ , то соответствующая погрешность  $\Delta \varepsilon / \varepsilon = \frac{2\Delta l}{\delta l} + \frac{\Delta l}{l} \approx 2 \cdot 10^{-2}$  в пять раз меньше, чем при использовании в качестве меры поврежденности предела прочности  $R$ . Если отношение  $z = (\delta R/R)/\varepsilon$  постоянно для конкретного бетона, то в соответствии с (3)  $(F/c)^q = [\delta R/R]/z \cdot \varepsilon_c$ , где  $\varepsilon_c = \delta l_c/l$ , а  $\delta l_c$  – изменение начального значения  $l$  (базы) после  $c$  термоциклов. По аналогии с выводом (6) находим:

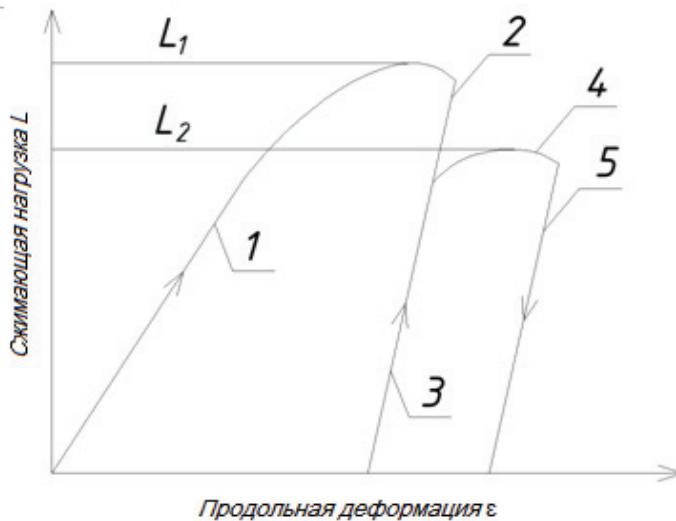
$$q(\ln F/c) = \ln[\delta R/R] - \ln z - \ln \delta l_c + \ln l, \quad (\ln F/c)\Delta q + q \frac{\Delta F}{F} = -\frac{\Delta z}{z} - \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l}, \text{ или} \\ \frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{q} \left\{ \frac{\Delta z}{z} + \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l} \right\} + \frac{\Delta q}{q} (\ln F/c). \quad (7)$$

Если  $z = const$ , то в соответствии с (1)  $\varepsilon_c = \varepsilon_1 c^q$ , а  $q \ln c = \ln \varepsilon_c - \ln \varepsilon_1$ . Тогда  $|\Delta q| = \frac{1}{\ln c} \left\{ \left| \frac{\Delta \delta l_c}{l_c} \right| + \left| \frac{\Delta \delta l_1}{\delta l_1} \right| + 2 \left| \frac{\Delta l}{l} \right| \right\}$ . Следовательно:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta z}{z} \right| + \left| \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left( \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta \delta l_1}{\delta l_1} + \frac{2\Delta l}{l} \right) \frac{\ln F/c}{\ln c} \right\} \approx \\ \approx \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta \delta R}{\delta R} \right|_z + \left| \frac{\Delta R}{R} \right|_z + \left| \frac{\Delta \delta l}{\delta l} \right|_z + \left| \frac{\Delta l}{l} \right|_z + \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l} + \left( \frac{1+c^q}{\ln c} \ln F/c \right) \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} \right\}, \quad (8)$$

где  $\left| \frac{\Delta R}{R} \right|_z$ ,  $\left| \frac{\Delta \delta R}{\delta R} \right|_z$ ,  $\left| \frac{\Delta \delta l}{\delta l} \right|_z$ ,  $\left| \frac{\Delta l}{l} \right|_z$  – относительные погрешности при экспериментальном определении значения  $z$ .

Для уменьшения этих погрешностей целесообразно каждый образец, прошедший термоциклирование, нагружать в условиях одноосного сжатия с заданным темпом до экстремальной нагрузки  $L_1$ , отвечающей пределу кратковременной прочности (рис. 3), разгрузить, определить посередине высоты образца относительную остаточную деформацию  $\varepsilon$  в направлении, перпендикулярном сжатию, повторно нагружать в условиях сжатия до экстремальной нагрузки  $L_2$  (рис. 3), а отношение  $z$  относительного снижения предела прочности  $\delta R/R$  к  $\varepsilon$  определить с учетом значений экстремальных нагрузок первого и второго нагружения по формуле  $z = (L_1 - L_2)/L_1 \varepsilon_1$ .



**Рисунок 3. Режим нагружения образца в условиях одноосного сжатия после термоциклирования:** 1 – кривая первого нагружения; 2 – прямая первого разгружения; 3 – прямая второго нагружения; 4 – кривая второго нагружения; 5 – прямая второго разгружения;  $\varepsilon_n$  – относительная продольная остаточная деформация;  $L_1$  – экстремальная нагрузка первого нагружения;  $L_2$  – экстремальная нагрузка второго нагружения

Для тяжелого бетона относительное снижение  $(L_1 - L_2)/L_1$  составляет в зависимости от степени гидратации цемента (срока твердения) от 60 до 6 %, в среднем 33 % ( $\Delta R \approx 0.33R$ ;  $|\Delta R/R|_z = 0.025$ ;  $|\Delta\delta R/\delta R|_z = 0.15$ ). При этом в среднем  $\varepsilon \approx 0.015$ ;  $\delta l \approx 1.5$  мм;  $|\Delta l/l|_z \approx 0.0005$ ;  $|\Delta\delta l/\delta l|_z \approx 0.07$  – при использовании штангельциркуля с погрешностью 0.05 мм, а при использовании дифференциального дилатометра  $\Delta l/l \approx 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $|\Delta\delta l/\delta l|_c \approx 0.02$ .

Подставив эти осредненные значения в (8), получаем погрешность  $\Delta F/F \approx 0.265/q$ , среднее квадратическое отклонение морозостойкости образцов  $S_F = 0.09F/q$  и коэффициент вариации  $\rho = \Delta F/3F = 0.09/q$  для ошибок определения  $F$  на одном образце.

Для выяснения взаимосвязи  $\delta R/R$  и  $\varepsilon$  использовали результаты испытаний по проверке способа [20]. Перед началом этих испытаний из одного замеса, содержащего портландцемент (1 весовую часть) марки 400, песок (2 в.ч.), гранитный щебень 5...20 мм (4.5 в.ч.) и воду (0.6 в.ч.), изготовили 108 образцов-кубов с ребром 150 мм, у которых точки пересечения диагоналей противоположных граней (реперные точки) отстояли друг от друга дальше (до 1.5 мм), чем остальные точки этих граней, соответствующие друг другу. Образцы твердели 28 дней в воде при комнатной температуре, а затем 60 дней – во влажном песке при 18...26 °C. Из этих 108 образцов 8 циклировали попеременно термически и механически, а 100 образцов использовали для оценки морозостойкости базовым методом [9]. При реализации базового метода расстояние  $l$  между реперными точками каждого образца измеряли с помощью инструментального микроскопа до и после испытаний на морозостойкость или на прочность. Остаточную деформацию  $\varepsilon$  рассчитывали как  $\delta l/l$ . Изменение расстояния  $\delta l$  между реперными точками при реализации метода [20] проводили на 20±2 °C до и после циклирования с помощью скобы с переменной базой и измерительной головкой часового типа (цена деления 1 мкм). Пороговую нагрузку  $L_0$  водонасыщенного образца определяли по способу [21], регистрируя акустическую эмиссию (АЭ) с помощью прибора АФ-15 при циклическом нагружении и разгружении образца до нуля. В первом опыте нагрузку  $L$  доводили до 11 т; при отсутствии акустической эмиссии в процессе окончания разгрузки значение  $L$  увеличивали на 5 % до тех пор, пока при окончании разгрузки не возникала

АЭ. За  $L_0$  принимали среднее  $L$  двух последних циклов. Предел длительной прочности  $R_0$  находили как отношение  $L_0$  к средней площади двух нагружаемых граней.

Термоциклирование упомянутых 8 образцов от +20 °C до -20 °C проводили по 10 раз подряд (декадами), после чего измеряли остаточную деформацию  $\delta l_T$ . Затем образец нагружали механически до нагрузки  $1.33L_0$  за 1...2 минуты и разгружали. Циклы повторяли до тех пор, пока остаточная деформация  $\delta l$  между реперными точками не превышала  $\delta l_T$  (от 12 до 19 циклов). После чего проводили очередную декаду термоциклов и т.д. до получения  $\delta R/R = 0.12...0.18$ . Затем рассчитывали коэффициент эквивалентности механического и циклического нагружения для конкретной  $i$ -й декады  $K_i = \delta\varepsilon_i / \delta\varepsilon_{Ti}$ , где  $\delta\varepsilon_i$  и  $\delta\varepsilon_{Ti}$  – соответственно приращения  $\delta\varepsilon$  и  $\delta\varepsilon_T$  после  $i$ -й декады. Значения  $K_i$  колебались от 1 до 1.10, а в среднем составляли 1.04. Умножив  $K_i$  на 10, получили число термоциклов, эквивалентных механическим нагружениям (каждое от 12 до 19 механических циклов).

Основные испытания результатов по методу [20] и их обработки даны в таблице 1, где приведены отношения  $z = (\delta R / R_0) / \varepsilon$  для 8 образцов после 20, 42, 63, 84 и 105 эквивалентных термоциклов, большая половина которых реализована механическим напряжением. Там же представлены средние  $z_{cp}$  по образцам после 20, 42, 63, 84 и 105 циклов, среднее  $\bar{z}$  для каждого из образцов и среднее средних  $\bar{\bar{z}}$ , равное 10.73. По этим значениям  $z$  рассчитаны выборочные дисперсии  $S^2$  для  $\bar{z}$  по формуле  $S^2 = \sum_1^8 (\bar{z}_i - \bar{z})^2 / 7$ , где  $i$  – номер образца, и для  $z = z_k$

после 105 циклов по аналогичной формуле, а также средние квадратические отклонения  $S$  и коэффициенты вариации  $\rho$ , равные отношению  $S$  к соответствующему выборочному среднему.

Разброс значений  $z$ , обусловленный ошибками измерений  $\delta R/R$  и  $\varepsilon$ , нетрудно рассчитать. Например, если  $z = (\delta R / R_0) / \varepsilon$  рассчитывать по конечным значениям  $(\delta R / R)_k$  и  $\varepsilon_k$  в опыте, как наиболее точными по сравнению с предшествующими, то  $(\Delta z / z) = (\Delta(\delta R / R)) / (\delta R / R) + (\Delta(\delta R / R)) / R + (\Delta(\delta l / l)) / (\delta l / l)$ . Отсюда с учетом средних по 8 образцам  $\delta R_K, \varepsilon_K$ , полученных после 105 циклов (табл. 1), находим:  $(\Delta z / z)_K = 6/14.2 + 0.03 + 2 \cdot 10^{-3} / (150 \cdot 0.149) + 0.002/150 = 0.46$ . Приняв вероятность появления максимальной ошибки, например  $\Delta z / z$  меньше 0.003, и руководствуясь нормальным законом распределения ошибок измерения, можно записать  $\Delta z = 3\sqrt{D}$ , где  $D$  – истинная дисперсия ошибок определения значений  $z$ . Оценкой этой  $D$  является выборочная дисперсия  $S^2$ , в таком случае  $\sqrt{D} = (\Delta z / z)\bar{z} / 3 = 0.153 \cdot 10.40 = 1.6$ , а  $D = 2.54$ .

Руководствуясь критерием Фишера, отличие  $D = 2.54$  от выборочной дисперсии  $S_{zk}^2 = 1.94$  можно считать случайным. Следовательно, разброс значений  $z_k$ , приведенных в таблице, обусловлен только ошибками измерений  $R_0, \varepsilon$ , а не колебаниями  $z$  от образца к образцу. А это, в свою очередь, позволяет полагать, что  $z$  – величина постоянная, по крайней мере, для конкретного состава бетона. Тогда, выяснив  $z$ , можно рассчитывать  $F$  по остаточным деформациям  $\varepsilon$  после термоциклирования.

При отсутствии неразрушающего контроля можно рассчитывать  $z$  по результатам прочностных испытаний выборок образцов до и после их термоциклирования. При реализации базового метода по [7] на двух выборках по 50 образцов из того же состава бетона, что и ранее упомянутых 8, получили без термоциклирования  $\bar{R} = 34.8$  МПа,  $S = 5.92$  МПа, а после 105 циклов –  $R = 29.2$  МПа,  $S = 4.1$  МПа,  $\delta R = 5.6$  МПа,  $\delta R/R = 0.161$ ,  $\varepsilon_{cp} = 1448 \cdot 10^{-5}$ ,

$S_\varepsilon = 77 \cdot 10^{-5}$ ,  $z = 11.1$ . Такие значения  $\delta R/R$ ,  $\varepsilon_{cp}$  и  $z$  случайно отличаются от соответствующих значений в таблице 1,  $\delta R/R = 0.1488$ ,  $\varepsilon_{cp} = 1439 \cdot 10^{-5}$ ,  $z_{cp} = 10.40$ .

**Таблица 1. Результаты экспериментального определения и остаточной обработки значений пределов прочности  $R$  и относительной остаточной деформации  $\varepsilon$  образцов бетона после различного числа циклов нагружения (термически и механически)**

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	Ср.
<b>Исходное значение <math>R_0</math> МПа</b>	9.45	16.8	22.7	23.4	24.3	24.3	25.0	30.1	22.0
<b>После 20 циклов</b>	$R_0$ , МПа	9.18	16.2	22.2	22.7	23.5	23.9	24.1	29.4
	$(\delta R/R) \cdot 10^{-5}$	2857	3571	2203	2991	3292	1646	3600	2326
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	216	210	204	206	204	200	202	190
	$z$	13.23	17.00	10.80	14.92	16.14	8.23	17.82	12.24
<b>После 42 циклов</b>	$R_0$ , МПа	9.03	16.15	21.9	22.3	23.4	22.9	23.9	20.4
	$(\delta R/R) \cdot 10^{-5}$	4482	3869	3524	4701	3704	561	4440	3222
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	406	452	404	408	394	396	410	394
	$z$	11.04	8.56	8.72	11.52	9.40	14.55	10.73	10.32
<b>После 84 циклов</b>	$R_0$ , МПа	8.10	14.7	19.1	21.2	21.0	23.0	22.6	26.7
	$(\delta R/R) \cdot 10^{-5}$	1429	893	1586	940	1244	1230	1253	1130
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	1206	1217	1188	1196	1201	1207	1196	991
	$z$	11.85	5.31	13.35	7.86	10.36	9.31	7.36	11.04
<b>После 105 циклов</b>	$R_0$ , МПа	7.75	14.2	18.6	20.1	21.1	20.9	21.4	26.4
	$(\delta R/R) \cdot 10^{-5}$	1799	1547	1806	1410	1317	1399	1440	1229
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	1582	1440	1435	1534	1561	1459	1297	1196
	$z$	11.37	10.74	12.59	9.19	8.43	9.59	11.10	10.28
$\bar{z}$ для образца		11.40	10.76	11.04	10.73	10.21	10.30	11.05	10.34
									$=$ $\bar{z} = 10.73$
$R$ – среднее значение предела длительной прочности в условиях сжатия; $\delta R$ – снижение $R$ в результате циклирования образца; $\varepsilon$ – относительная остаточная деформация образца в направлении, перпендикулярном сжатию; $z = (\delta R/R)/\varepsilon$ ; $z_k$ – значение $z$ после 105 циклов; $\bar{z}$ – среднее значение $z$ для образца; $\bar{z}$ – среднее для $z$ ; $S^2$ – выборочная дисперсия; $S$ – среднее квадратическое отклонение; $\rho$ – коэффициент вариации								$S^2$	$S$
								1.94	1.394
								0.183	0.428
									0.04

Это обстоятельство доказывает, что:

- использование неразрушающего способа оценки снижения прочности [21] дает практически те же значения  $z$  и  $F$ , что и при использовании разрушающего выборочного контроля, но с более высокой точностью;
- значения  $z$  не чувствительны к замене части термоциклов механическими, а также к исходным и текущим значениям  $R_0$ .

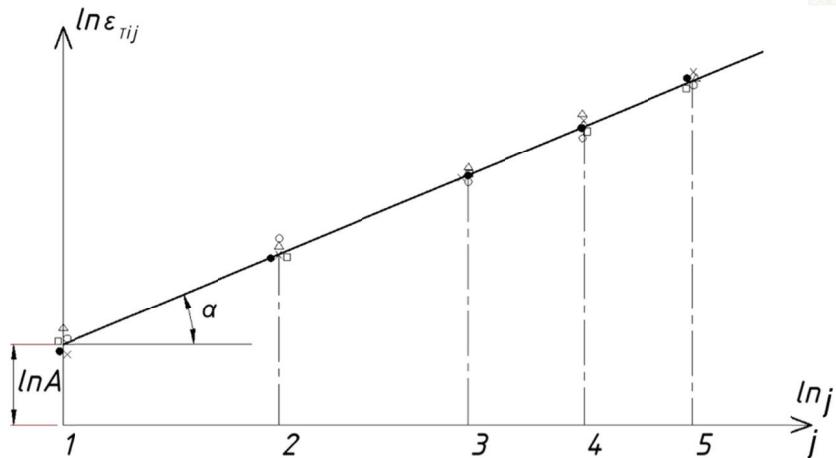
Предложенный способ реализуют следующим образом. Из одного замеса бетонной смеси по одинаковой технологии готовят несколько образцов, например 5, согласно [18]. Образцы по п. 4 [9] насыщают водой, обмеряют и помещают в измерительную камеру дилатометра объемного дилатометра типа ДОД-100-К, а во вторую его камеру помещают стандартный алюминиевый образец. Обе камеры заполняют керосином и герметизируют. Дилатометр с образцами устанавливают в морозильную камеру и после 30 минут выдержки начинают замораживание со скоростью около 0.3 °С/мин до достижения температуры (20±2) °С. Разморозив образец с той же скоростью, по графику показателя разностей объемных деформаций бетонного и алюминиевого образца находят значение остаточной относительной объемной деформации  $\varepsilon_{Tij}$  бетонного образца после каждого  $i$ -го термоцикла. Каждый образец замораживают и размораживают таким образом по крайней мере 4 раза. После термоциклирования каждый образец нагружают в условиях одноосного сжатия с заданным темпом до экстремального значения нагрузки первого нагружения  $L_{\max} = L_1$  (рис. 3). Значение  $L_{\max}$  регистрируют по ведомой стрелке динамометра пресса. Момент размыкания электроконтактов на ведомой и ведущей стрелке фиксируют по световому сигналу, который одновременно указывает на необходимость начать плавную разгрузку образца. После полного разгружения без перестановки образца замеряют остаточную деформацию  $i$ -го в направлении, перпендикулярном сжатию. Относительную остаточную деформацию  $\varepsilon_i$  в направлении, перпендикулярном сжатию, для  $i$ -го образца рассчитывают по формуле  $\varepsilon_i = \Delta a_i / a_0$ , где  $a_0$  – размер  $i$ -го образца до сжатия в направлении, перпендикулярном сжатию;  $\Delta a_i$  – остаточное изменение этого размера.

Повторяют осевое сжатие образца с прежним темпом до значения экстремальной нагрузки второго нагружения  $L_2$ . Для  $i$ -го образца рассчитывают отношение  $z_i$  относительного снижения предела прочности к относительной остаточной деформации в направлении, перпендикулярном сжатию  $z_i = (L_{1i} - L_{2i}) / (L_{1i} \varepsilon_{0i})$ , где  $L_{1i}$  и  $L_{2i}$  – экстремальная нагрузка на  $i$ -й образец при первом и втором нагружении соответственно.

Затем рассчитывают среднее  $z = \sum z_i / n$ , где  $n$  – число образцов; значение относительной остаточной деформации  $\varepsilon_M$ , соответствующей допускаемому стандартом относительному снижению предела прочности, по формуле  $\varepsilon_M = [\delta R/R]/z$ , где  $[\delta R/R]$  – допускаемое стандартом относительное снижение предела прочности.

По значениям  $\varepsilon_{Tij}$  строят график, аналогичный рисунку 4, и с его помощью определяют значения  $\lambda$  как осредненный  $\operatorname{tg}\alpha$ . По значениям  $\varepsilon_{Ti}$  при последних  $j$ -х циклах рассчитывают среднее  $\bar{\varepsilon}_{Tj} = \sum \varepsilon_{Ti} / j$ . В соответствии с (1) при  $z = \text{const}$   $\varepsilon_c = \varepsilon_1 c^q$ , следовательно,  $\varepsilon_M / \bar{\varepsilon}_{Tj} = (F_i / j)^q$ . По этой формуле можно рассчитать значения  $F_i$ , а затем и оценку морозостойкости испытанного камня  $\bar{F} = \sum F_i / n$ , где  $n$  – количество испытанных образцов.

В частности, метод был реализован на 10 образцах-кубах с ребром 10 см в возрасте 88 дней, изготовленных из бетонной смеси такого состава: портландцемент марки 400 – 1 весовая часть, песок – 2 весовые части, гранитный щебень 5...20 мм – 4.5 весовые части, вода – 0.6 весовой части. Для этого бетона ранее было экспериментально установлено значение морозостойкости по первому базовому методу [7] при допускаемом стандартом относительном снижении предела прочности, равном 0.15, которое составило  $F_{0,15} = 105$ , где  $F_{0,15}$  – известное значение морозостойкости при  $[\delta R/R] = 0.15$ .



**Рисунок 4. График для определения параметров  $A$  и  $\lambda$  зависимости остаточной деформации  $\varepsilon_T = A j^\lambda$  по данным об относительных остаточных деформациях  $\varepsilon_{Tij}$  для  $i$ -го образца после  $j$ -го термоцикла;  $j$  – количество термоциклов;**

**А – температурная относительная остаточная деформация после первого термоцикла;  $\alpha$  – угол наклона прямой к горизонтали;  $\bullet$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\times$  – точки, полученные по результатам испытаний, соответственно, I, II, III, IV и V образцов**

Образцы насыщали водой по [7], обмеряли и помещали в измерительную камеру дифференциального объемного дилатометра ДОД–100–К, а во вторую его камеру помещали стандартный алюминиевый образец. Обе камеры заполняли керосином и герметизировали. Дилатометр с образцами устанавливали в морозильную камеру и после 30 минут выдержки начинали замораживание со скоростью  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до достижения температуры  $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После размораживания с той же скоростью по графику показателя разностей объемных деформаций бетонного и алюминиевого образца находили значение остаточной относительной объемной деформации бетонного образца после последнего, пятого, термоцикла ( $j = 5$ ).

Осевое сжатие образцов со скоростью  $400\text{ кг}/\text{с}$  осуществляли на гидравлическом прессе. Значения экстремальных нагрузок  $L_1$  и  $L_2$  определяли по положению контрольной (ведомой) стрелки. Плавное разгружение образца начинали по сигналу контрольной лампочки, выключаемой электроконтактом между ведущей и ведомой стрелкой динамометра.

В таблице 2 приведены результаты этих опытов для каждого образца, включающие относительные снижения пределов прочности и относительные остаточные деформации в направлении, перпендикулярном сжатию.

**Таблица 2. Результаты реализации предложенного метода**

Номер образца	$\frac{\Delta R}{R}$	$\varepsilon_{0i} \cdot 10^3$	$z_i$	$\varepsilon_{Ti5} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{Mi}}{\varepsilon_{Ti5}}$	$F_i$
1	0.093	8.86	10.50	56	24.78	76
2	0.077	6.99	11.02	42	33.04	97
3	0.105	9.91	10.60	40	34.69	102
4	0.081	7.49	10.82	38	36.5	106
5	0.092	7.95	11.57	38	36.5	106
6	0.063	5.83	10.80	37	37.5	109
7	0.114	10.16	11.22	36	38.54	111
8	0.080	7.66	10.40	34	40.81	117
9	0.106	9.53	11.12	33	42.05	120
10	0.096	9.55	10.05	31	44.76	127
Среднее	0.92	8.40	10.81			107

Для каждого образца рассчитывали показатели морозостойкости по формуле:

$$F_i = 5 \left( \frac{\varepsilon_{Mi}}{\varepsilon_{Ti5}} \right)^{\frac{1}{\lambda}}, \quad (9)$$

где  $F_i$  – показатель морозостойкости для  $i$ -го образца;  $\varepsilon_{Mi}$  – относительная остаточная деформация, соответствующая допускаемому стандартом относительному снижению предела прочности, для  $i$ -го образца;  $\varepsilon_{Ti5}$  – относительная остаточная деформация  $i$ -го образца после пятого термоцикла;  $\lambda$  – постоянная материала;  $i$  – номер образца.

Среднее для показателей морозостойкостей  $F_i$  составило  $\bar{F} = 107$ . Среднее квадратичное отклонение для значений  $F_i$  составило  $S = 17$ . Следовательно, при вероятности 0.95 доверительный интервал для  $\bar{F}$  составляет

$$2S_{\bar{F}} = \frac{2 \cdot 17}{\sqrt{10}} = 10,8, \quad (10)$$

где  $S_{\bar{F}}$  – среднее квадратичное отклонение для значений морозостойкости образцов.

Таким образом, можно считать отличие  $\bar{F} = 107$  от известного значения  $F_{0.15} = 105$  случайнм, а предложенный способ корректным.

Таким образом, показано, что предложенный способ позволяет повысить экономичность, эффективность и скорость определения морозостойкости пористых тел. Также следует отметить, что этот способ может быть использован для определения морозостойкости пористых материалов, насыщенных водными растворами солей. Для этого достаточно насыщать образцы соответствующими растворами как при термоциклировании, так и при определении  $z$  повторным одноосным сжатием.

## Область применения

Область применения предлагаемого ускоренного метода распространяется на тяжелые мелкозернистые, легкие и плотные силикатные бетоны. На данном этапе вопрос о применении метода для определения морозостойкости бетонов дорожных и аэродромных покрытий, а также в солях не прорабатывался. Теоретически, для этих случаев использование метода допустимо. Например, для определения морозостойкости в солях возможно использование образцов, насыщенных соответствующими растворами солей, но данная теория не проверялась практически. После проведения необходимых экспериментов область применения предлагаемого ускоренного метода определения морозостойкости пористых материалов может быть расширена.

## Заключение

1. Показано, что использование неразрушающего контроля  $R$  позволяет определять марку  $F$  испытанием одного образца, что резко снижает трудоемкость. Однако такой контроль должен обладать высокой точностью (1...3 %) и не увеличивать повреждаемость материала, что обуславливает выбор в качестве  $R$  предела длительной прочности.

2. Предложена замена термоциклов более оперативными циклами механического нагружения, эквивалентными по вносимой поврежденности, за меру которой принята величина остаточной деформации. Подобная замена значительно снижает время проведения испытаний.

3. Выявлена необходимость в проведении испытаний над другими пористыми материалами с целью расширения области применения предложенного метода.

4. Обоснован новый метод ускоренного определения морозостойкости бетона, который отличается повышенной оперативностью, малой трудоемкостью и экономичностью. Была оформлена и подана заявка на изобретение [23].

## Литература

1. Skripkiunas G., Nagrockiene D., Girska G., Vaičiūne M., Baranauskaitė E. The cement type effect on freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete // Procedia Engineering. 2013. No. 57. Pp. 1045–1051.
2. Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A., Vatin N., Chumadova L. Influence of Plasticizing and Siliceous Additives on the Strength Characteristics of Concrete // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725–726. Pp. 461–468.
3. Barabanshchikov Y., Komarinskiy M. Effect of Air-Entraining Agent LHD on the Technological Properties of Concrete Mix Containing Superplasticizer S-3 // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725–726. Pp. 419–424.
4. Nagrockien D., Girska G., Skripkiunas G. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite// Construction and Building Materials. 2014. No. 66. Pp. 45–52.
5. Kewalramani M.A., Gupta R. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks // Automation in Construction. 2006. Vol. 15. No. 3. Pp. 374–379.
6. Kölö A., Rantala T., Lahdensivu J., Nurmikolu A. Freeze-thaw resistance testing of concrete railway sleepers // 5th International Conference on Concrete Repair: Concrete Solutions. Proceedings of Concrete Solutions. 2014. Pp. 533–539.
7. ГОСТ 10060–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
8. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
9. Судаков В.Б. Пути совершенствования технологии бетона гидротехнических сооружений // Гидротехнический бетон и его работа в сооружении: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергоатомиздат, 1984. С. 4–16.
10. BS EN 206:2013. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
11. Антонова М.В., Глушки Д.В., Беляева С.В., Пакрастинш Л. Сравнительный анализ Европейской и Российской технической документации строительных материалов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №4 (19). С. 34–50.
12. RILEM Technical Committee. TDC, CDF Test, Test Method for the Freeze-Thaw-Resistance of concrete with sodium chloride solution, RILEM TC 117-FDC Recommendation. Germany, 2001. 27 p.
13. Swedish Standard. Concrete testing – Hardened Concrete-Frost Resistance, SS 137244. Sweden, 2005.
14. Liisma E., Raado L.M. Internal and external damages of concrete with poor quality of coarse limestone aggregate // Europe towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations. Prague, 2013. Pp. 1–4.
15. Алексеев А.В., Дикун А.Д., Фишман В.Я., Дикун В.Н. Опыт экспрессного определения морозостойкости бетона транспортных сооружений // Строительные материалы. 2005. №8. С. 55–57.
16. Radlinski M., Oleic J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods // ASTM International. 2010. Vol. 7. No. 4. Pp. 64–85.
17. Никольский С.Г., Никольская Т.С. Влияние температуры на пороговые параметры прочности керамики // Петербургский журнал электроники. 2011. №1. С. 25–28.

## References

1. Skripkiunas G., Nagrockiene D., Girska G., Vaičiūne M., Baranauskaitė E. The cement type effect on freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete. *Procedia Engineering*. 2013. No. 57. Pp. 1045–1051.
2. Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A., Vatin N., Chumadova L. Influence of Plasticizing and Siliceous Additives on the Strength Characteristics of Concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 461–468.
3. Barabanshchikov Y., Komarinskiy M. Effect of Air-Entraining Agent LHD on the Technological Properties of Concrete Mix Containing Superplasticizer S-3. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 419–424.
4. Nagrockien D., Girska G., Skripkiunas G. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66. Pp. 45–52.
5. Kewalramani M.A., Gupta R. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Automation in Construction*. 2006. Vol. 15. No. 3. Pp. 374–379.
6. Kölö A., Rantala T., Lahdensivu J., Nurmikolu A. Freeze-thaw resistance testing of concrete railway sleepers. 5th International Conference on Concrete Repair: Concrete Solutions. Proceedings of Concrete Solutions. 2014. Pp. 533–539.
7. GOST 10060-2012. Concretes. Basic method for the determination of frost-resistance. 2012. (rus)
8. GOST 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. 2012. (rus)
9. Sudakov V.B. Puti sovershenstvovanija tehnologii betona gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Ways of improving the technology of concrete transport facilities]. *Gidrotehnicheskij beton i ego rabota v sooruzhenii: materialy konferencii i soveshanij po gidrotehnike*. Leningrad. Energoatomisdat. 1984. Pp. 4–16. (rus)
10. BS EN 206:2013. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
11. Antonova M.V., Glushko D.V., Belyaeva S.V., Pakrastinsh L. A comparative analysis of European and Russian technical documentation of building materials. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 4(19). Pp. 34–50. (rus)
12. RILEM Technical Committee. TDC, CDF Test, Test Method for the Freeze-Thaw-Resistance of concrete with sodium chloride solution. RILEM TC 117-FDC Recommendation. Germany. 2001. 27 p.
13. Swedish Standard. Concrete testing – Hardened Concrete-Frost Resistance. SS 137244. Sweden. 2005.
14. Liisma E., Raado L.M. Internal and external damages of concrete with poor quality of coarse limestone aggregate. *Europe towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*. Prague. 2013. Pp. 1–4.
15. Alekseev A.V., Dikun A.D., Fishman V.Ja., Dikun V.N. Opyt jekspresnogo opredelenija morozostojkosti betona transportnyh sooruzhenij [Experience the rapid determination of freeze-thaw resistance of concrete transport facilities]. *Stroitel'nye Materialy*. 2005. No. 8. Pp. 55–56. (rus)
16. Radlinski M., Oleic J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods. *ASTM International*. 2010. Vol. 7. No. 4. Pp. 64–85.

18. Никольский С.Г., Никольская Т.С. Экспресс-методы оценки длительной стойкости бетона // Материалы III МК «Популярное бетоноведение». СПб, 2009. С. 35–44.
19. Кунцевич О.В. Бетон высокой морозостойкости для сооружений крайнего севера. Л.: Стройиздат, 1983. 132 с.
20. Никольский С.Г., Никольская Т.С., Акимов С.В. Образец для сжатия камня при оценке его морозостойкости. Патент России № 2370767. 2009.
21. Воронцова Е.А., Никольский С.Г. Рекомендации по выбору водоцементного отношения при проектировании бетона из условия его морозостойкости // XL Неделя науки СПбГПУ: Материалы НПК. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2011. С. 344–345.
22. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
23. Никольский С.Г., Перцева О.Н. Способ определения морозостойкости пористых материалов. Заявка на патент № 2014116713/20 от 5.06.2014.
17. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S. Vlijanie temperatury na porogovye parametry prochnosti keramiki [Effect of temperature on the threshold strength properties of ceramics]. Peterburgskiy zhurnal elektroniki. 2011. No.1. Pp. 25–28. (rus)
18. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S. Jekspress-metody ocenki dlitelnoj stojkosti betona.[Express-method of assessing long-term durability of concrete]. Materialy III MK «Populjarnoe betonovedenie». Saint Petersburg. 2009. Pp. 35–44. (rus)
19. Kuncevich O.V. Beton vysokoj morozostojkosti dla sooruzhenij krajnego severa. [Concrete with high freeze-thaw resistance for construction of the Far North]. Leningrad. Stroizdat. 1983. 132 p. (rus)
20. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S., Akimov S.V. Obrazec dlja szhatija kamnia pri ocenke ego morozostojkosti. [The sample is for compression stone in determining its freeze-thaw resistance]. Patent RU 2370767. 2009. (rus)
21. Voroncova E.A., Nikolskij S.G. Rekomendacii po vyboru vodo cementnogo otnosheniya pri proektirovani betona iz uslovija ego morozostojkosti [Recommendations on choosing the water-cement ratio in concrete design based on its freeze-thaw resistance condition]. XL Nedela nauki SPbPU: Materialy NPK. [XL science week SPbPU: Materials of Scientific Conference]. St. Petersburg: publ. SPbPU, 2011. Pp. 344–345. (rus)
22. Mitropolskij A.K. Tehnika statisticheskikh vychislenij [Technique of statistical calculations]. Moscow. Nauka. 1971. 576 p.(rus)
23. Nikolskij S.G., Perceva O.N. Sposob opredelenija morozostojkosti poristyh materialov [A method of determining the freeze-thaw resistance of cellular material]. Application for a patent No. 2014116713/20 from 5.06.2014. (rus)

Сергей Григорьевич Никольский,  
+79214235776; эл. почта: [big\\_panda16@mail.ru](mailto:big_panda16@mail.ru)

Ольга Николаевна Перцева,  
+79531711053; эл. почта: [olya\\_perceva@mail.ru](mailto:olya_perceva@mail.ru)

Виктория Игоревна Иванова,  
+7(981)7348483; эл. почта:  
[Viktoriaviktoriaaaa@mail.ru](mailto:Viktoriaviktoriaaaa@mail.ru)

Sergey Nikolskiy,  
+79214235776; [big\\_panda16@mail.ru](mailto:big_panda16@mail.ru)

Olga Pertseva,  
+79531711053; [olya\\_perceva@mail.ru](mailto:olya_perceva@mail.ru)

Viktoriiia Ivanova,  
+7(981)7348483; [Viktoriaviktoriaaaa@mail.ru](mailto:Viktoriaviktoriaaaa@mail.ru)

© Никольский С.Г., Перцева О.Н., Иванова В.И., 2015