



Research Article






Received: March 26, 2023

Accepted: April 24, 2023

Published: May 1, 2023

ISSN 2658-5553

The influence of freeze-thaw methods on the frost resistance of concrete paving flags

Baranov, Aleksey Olegovich^{1*} 
Odnodvortsev, Dmitry Sergeevich¹ 
Novoselov, Dmitry Artemovich¹ 
Konstantinova, Alexandra Andreevna¹ 
Lyubomirova, Elena Evgenievna² 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; aleksey.o.baranov@yandex.ru (B.A.O.); odndima7659@gmail.com (O.D.S.); dima.novoselov.02@bk.ru (N.D.A.); sanyaalex1224@gmail.com (K.A.A.)

² LLC «Vibor-spb», St. Petersburg, Russian Federation; lyubomirova.ee@vibors.ru (L.E.E.)

Correspondence: * email aleksey.o.baranov@yandex.ru

Keywords:

Concrete; Paving flags; Frost resistance; Freezing and thawing; Frost damages; Scaling

Abstract:

The object of research is the concrete of single layer and double layer paving flags made by vibropressing technology. The purpose of this work is to study the effect of freezing and thawing methods on the frost resistance of concrete paving flags. **Method.** In this work, some samples of paving flags were subjected to freezing and thawing from all sides and the other part through one side (other surfaces of the specimen were thermally insulated). The frost resistance was evaluated by the measurement of mass scaled from the top surface of samples after 20 freeze–thaw cycles. **Results.** The obtained results allow us to conclude that the method of freezing and thawing exposure has a significant effect on the frost resistance of concrete. The freezing and thawing through one side of samples led to the appearance of temperature gradients along the height of the paving flags, which model more severe operating conditions than freezing and thawing from all sides of samples.

1 Introduction

Долговечность бетонных изделий, эксплуатирующихся под открытым небом, а особенно это касается изделий для дорожного строительства, обеспечивается их морозостойкостью [1]. Морозостойкость бетона — это способность бетона в насыщенном состоянии выдерживать многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения (трещин, сколов, шелушения ребер образцов), снижения прочности, изменения массы и других технических характеристик [2]. Разрушение бетона при воздействии отрицательных температур обусловлено, в общем случае, давлением на стенки пор при замерзании воды [3]. Однако само по себе это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона при действии на него отрицательных температур. В нашей работе мы не рассматриваем существующие гипотезы морозного разрушения бетона, поэтому предлагаем ознакомиться с работами следующих авторов [4], [5], [6], где представлен наиболее полный обзор.

Морозостойкость бетона зависит от многих факторов, которые условно можно подразделить на внутренние и внешние. К внутренним факторам можно отнести: состав бетона, качество материалов, пористость и т. п.



На строение порового пространства в бетоне наибольшее влияние оказывает водоцементное отношение (В/Ц). С увеличением водоцементного отношения увеличивается общий объем капиллярных пор, что негативно сказывается на морозостойкости бетона.

Влияние вида цемента на морозостойкость бетона связано с минералогическим составом, тонкостью помола и наличием активных минералогических добавок. Из следующих работ [7], [8], [9] известно, что добавление золы уноса отрицательно влияет на морозостойкость цементных бетонов. Однако введение воздухововлекающих добавок в состав бетона, содержащий золу, повышает стойкость к попеременному замораживанию и оттаиванию. Представленные в работе [10] результаты показывают, что растворы с воздухововлекающей добавкой и золой уноса (класс С по [11] ASTM C618), добавленной взамен цемента, обладали большей стойкостью к сульфатной коррозии и действию мороза, чем растворы без воздухововлечения на портландцементе. В работах [12], [13] составы бетона, содержащие золу уноса и микрокремнезем, показали хорошую стойкость к комплексному воздействию мороза и сульфатной коррозии. Испытание высокопрочного бетона с микрокремнеземом взамен цемента без воздухововлекающих добавок в работе [14] показало снижение прочности на сжатие до 30% с увеличением доли замещения цемента после 150 циклов замораживания и оттаивания. В исследованиях следующих авторов [15], [16] добавление молотого гранулированного шлака взамен цемента привело к снижению морозостойкости бетона. В работе [17] авторы утверждают, что бетон с молотым гранулированным шлаком и относительно низким отношением воды к цементу (В/Ц), равным 0.45, показал хорошую стойкость к воздействию попеременного замораживания и оттаивания в среде 3% водного раствора NaCl. Ранее в исследовании [18] авторы отмечали, что бетон на шлакопортландцементе (тип СЕМ III) обладал наибольшей стойкостью после 28 циклов в среде 3% водного раствора NaCl в сравнении с обычным портландцементом (тип СЕМ I) и портландцементом с минеральными добавками (тип СЕМ II).

Внешними факторами являются: минимальная температура при испытании (эксплуатации), скорость и среда (условия) замораживания и оттаивания, частота смен, размеры конструкции (элемента), напряженное состояние элементов.

В работе [19] авторы исследовали влияние различных режимов замораживания на морозостойкость тяжелого бетона. В качестве критериев оценки морозостойкости бетона после циклов замораживания и оттаивания использовали: количество материала, отделившегося от поверхности образца (шелушение поверхности); динамический модуль упругости (оценка внутренних повреждений). Результаты опытов показали, что замораживания образцов бетона со скоростью 4 °С в час привело к большему разрушению поверхности образца, чем со скоростью 10 °С в час. Кроме того, существенное разрушение поверхности образцов при более медленном замораживании было у состава бетона с более высоким В/Ц, чем для образцов с более низким отношением. Также увеличение выдержки образцов при минимальной температуре привело к увеличению повреждений на поверхности образцов и внутри бетона. Результаты исследования морозостойкости высокопрочного бетона с воздухововлекающими добавками и без [20] показали, что медленная скорость в сравнении с быстрой привела к большему разрушению поверхности образцов. При этом увеличение скорости замораживания образцов бетона с воздухововлечением привело к увеличению внутренних повреждений. Исследование скорости замораживания в диапазоне от 2 до 7 °С в час образцов тяжелого бетона в работе [21] показало несущественное влияние на внутренние повреждения бетона (в качестве критерия применялся динамический модуль упругости).

Среда замораживания и оттаивания при испытании (или эксплуатации) также оказывает существенное влияние на морозостойкость бетона. Авторы статьи [22] определяли механические и структурные характеристики фибробетона после 180 циклов замораживания и оттаивания в пяти различных средах. Наибольшие разрушения наблюдались для образцов, которые испытывались в 5% водном растворе хлорида натрия (NaCl). Далее следуют в порядке уменьшения воздействия на фибробетон: смесь 5% водного раствора Na₂SO₄ и 5% водного раствора NaCl; 5% водный раствор сульфата натрия (Na₂SO₄); вода; воздух. В работе [23] среда водного раствора CaCl₂ оказала более разрушительное воздействие на бетон, чем среда водного раствора NaCl.




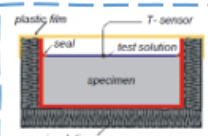
Литературный обзор показал, что работ по исследованию внешних факторов на морозостойкость бетона недостаточно. При этом, совершенно очевидно, повреждения в бетоне, вызванные замораживанием и оттаиванием, существенно зависят от особенностей местного климата и условий эксплуатации конструкций (элементов) или изделий.

Данная работа направлена на изучение влияния условий эксплуатации тротуарной плитки на морозостойкость бетона.

Анализ возможных условий эксплуатации дорожных покрытий показывает, что температурные воздействия на тротуарную плитку могут быть как объемными, так и односторонними. Существующие методики по оценке морозостойкости бетона тротуарной плитки, изложенные в нормативных документах, рассматривают (моделируют) различные условия эксплуатации плитки. Сравнительный анализ проводился по трем нормативным документам: межгосударственный стандарт ГОСТ 17608–2017 [24], стандарт EN 1339:2003 [25] (страны Евросоюза), стандарт ASTM C1645-2016 [26] (США).

Таблица 1. Сравнительный анализ различных методик по оценке морозостойкости бетона тротуарной плитки

Table 1. Analysis of test methods for the estimation of frost resistance of concrete paving flags

TEST PARAMETERS	INTERSTATE STANDARD GOST 17608—2017	STANDARD EN 1339 2003 	STANDARD ASTM C 1645 2016 
			
<i>Number of samples, pcs.</i>	18	3	at least 3
<i>Sample Sizes</i>	100 x 100 x h = (40 - 100) mm	The area of the front surface is not less than 75 and not more than 250 cm ² . The height of the sample is not more than 10.3 cm	Contact area of at least 190 cm ²
<i>Age of samples at the time of testing</i>	Project age	from 28 to 35 days	28 days
<i>Saturation of samples</i>	Volumetric (5% NaCl solution)	Surface (drinking water)	Volumetric (drinking water or 3±0.1% NaCl)
<i>Freezing and thawing method</i>	from all sides	from one side (other surfaces of the specimen were thermally insulated)	from all sides
<i>Test environment</i>	5 % NaCl	3 % NaCl	drinking water or 3±0.1 % NaCl
<i>Number of test cycles</i>	20 и 37	28	28 or 49
<i>Minimum ambient temperature</i>	Minus 50 ± 5 °C	Minus 20 ± 4 °C	Minus 5 ± 3 °C
<i>Duration of one cycle, hour</i>	24	24	24
<i>Criteria</i>	1. Scaling of the front surface 2. Reduction of concrete compressive strength 3. The presence of cracks	Scaling of the front surface	Scaling of all contact surfaces
<i>Critical value of criteria</i>	1. Not more than 500 g/m ² 2. Not more than 5% 3. Not cracks	Scaling not more than 1000 g/m ²	Scaling not more than 225 g/m ² after 28 cycles, or not more than 500 g/m ² after 49 cycles

При сравнении параметров испытания можно видеть, что методики существенно отличаются друг от друга (таблица 1). При этом параметры испытания, такие как среда замораживания и оттаивания, насыщение образцов и минимальная температура замораживания, в методиках стандартов EN 1339:2003 и ASTM C1645-2016 моделируют более мягкие условия эксплуатации тротуарной плитки, чем в межгосударственном стандарте ГОСТ 17608–2017.

Одним из основных параметров в методиках испытания является способ (метод) замораживания и оттаивания образцов. В стандартах ГОСТ 17608–2017 Приложение Е и ASTM C1645-2016 образцы тротуарной плитки подвергаются объемному (всестороннему) замораживанию и оттаиванию. В стандарте EN 1339:2003 Приложение D образцы подвергаются одностороннему воздействию температуры со стороны лицевой поверхности образца (остальные поверхности ограждаются теплоизолирующим материалом).

В научной и технической литературе практически отсутствует информация о влиянии способа замораживания и оттаивания на морозостойкость бетона. Поэтому интересной представляется задача по изучению влияния способов замораживания и оттаивания (объемного и одностороннего) на морозостойкость бетона тротуарной плитки.

2 Materials and Methods

Объектом исследования является бетон однослойной и двухслойной тротуарной плитки, изготовленной по технологии вибропрессования. Готовые изделия тротуарной плитки соответствуют требованиям ГОСТ 17608–2017 [24]. Согласно паспорту на изделия: класс бетона по прочности на сжатие не ниже В25; проектная марка по морозостойкости F200; водопоглощение бетона не более 6%; истираемость не более 0.7 г/см².

Общий вид плитки показан на рисунке 1. Стоит заметить, что двухслойная плитка, в отличие от однослойной, представляет собой изделие, состоящее из двух слоев бетона: нижний слой – это основа, обеспечивающая прочностные характеристики плитки; верхний (лицевой) слой – износостойкий, ударопрочный, обладающий декоративными свойствами. При этом лицевой слой плитки составляет в среднем 4-10 мм (10 % от номинальной толщины плитки).

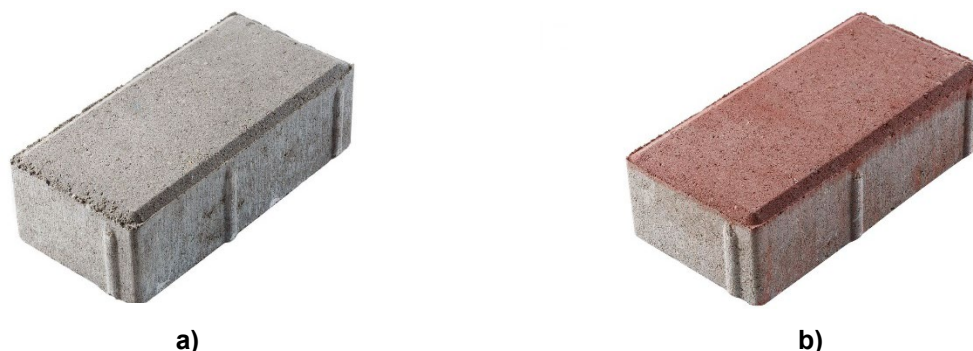


Рис. 1 Общий вид вибропрессованной тротуарной плитки: а – однослойной; б – двухслойной
Fig. 1 General view of paving flags: a – single layer; b - double layer

Ниже в таблице 2 приведены составы бетона для однослойной и двухслойной тротуарной плитки, предоставленные производителем тротуарной плитки. Изделия были изготовлены на портландцементе ЦЕМ I 52.5Н.

Таблица 2. Составы бетона для однослойной и двухслойной тротуарной плитки
Table 2. Mixture proportions and characteristics of concrete for single layer and double layer paving flags

Бетон	Расход основных компонентов, кг/м ³			В/Ц	Прочность на сжатие плитки, МПа
	Цемент	Песок	Щебень фракции 3-10 мм		
ОДНОСЛОЙНАЯ ТРОТУАРНАЯ ПЛИТКА					
<i>Основной</i>	470	1080	750	0.42	49.3
ДВУХСЛОЙНАЯ ТРОТУАРНАЯ ПЛИТКА					
<i>Основной</i>	490	1080	750	0.42	
<i>Облицованный (лицевой)</i>	470	1690	-	0.29	59.6

Готовые изделия однослойной и двухслойной плитки 100x200x60 мм распиливались алмазным диском пополам на образцы с размерами 100x100x60 мм. Общий вид образцов для испытания представлен на рисунке 2 а, б. После распиливания образцы плитки выдерживали в сушильной камере при температуре 105°С до постоянной массы (см. рисунок 2 с).

Каждый вид образцов тротуарной плитки (однослойной и двухслойной) разделялся на две группы испытаний по оценке морозостойкости бетона плитки:

- к **ПЕРВОЙ ГРУППЕ** отнесены образцы однослойной и двухслойной плитки, которые испытывались в соответствии с методикой норм ГОСТ 17608 Приложение Е, согласно которой образцы подвергаются объемному (всестороннему) замораживанию и оттаиванию;
- к **ВТОРОЙ ГРУППЕ** отнесены образцы однослойной и двухслойной плитки, которые подвергаются одностороннему замораживанию и оттаиванию только со стороны лицевой поверхности по разработанной методике, описанной ниже по тексту.

Разработанная методика отличается от методики ГОСТ 17608 Приложение Е только двумя параметрами испытания: насыщение образцов до испытания было поверхностное



(осуществлялось через лицевую поверхность) и способ замораживания и оттаивания образцов плитки - односторонний. Согласно двум методикам были проведены сравнительные испытания по оценке морозостойкости бетона.

Стоит отметить, что в представленной работе испытательные образцы были получены из готовых изделий тротуарной плитки с заданными характеристиками одного производителя. При этом для более корректной оценки морозостойкости бетона по методике одностороннего замораживания и оттаивания (разработанной авторами) необходимо провести испытания тротуарной плитки разных производителей. Однако испытания большого количества образцов накладывает определенную трудности. Поэтому ставим себе эту задачу в последующих работах.

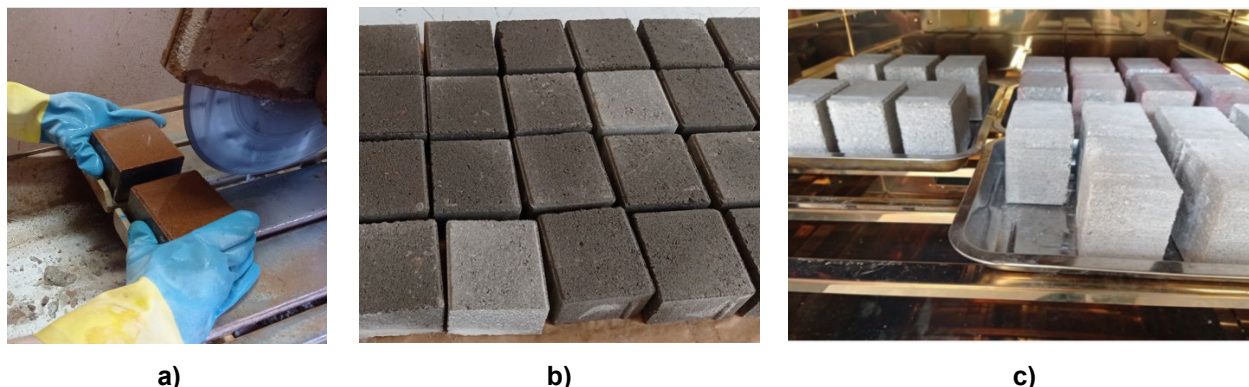


Рис. 2 Общий вид образцов тротуарной плитки до испытания: а, b – после распиливания на образцы 100x100x60 мм; с – в сушильной камере
Fig. 2 General view of samples before testing: a, b – after sawing into samples of 100x100x60 mm; c – in drying oven

На образцах однослойной и двухслойной плитки **первой группы** выполнялась наклейка самоклеящейся ленты по верху боковых поверхностей для создания бортика. Лента возвышалась над лицевой поверхностью образца на 2—5 мм. Для исключения потери отделившегося материала с лицевой поверхности ленту укрепили с помощью полимерного шпагата, обмотав два-три раза вокруг образца. После образцы насыщали в течение 96 часов 5-процентным водным раствором хлорида натрия температурой (20 ± 2) °С, погрузив в раствор. Были подготовлены к испытанию 6 образцов однослойной и двухслойной плитки (рисунок 3).

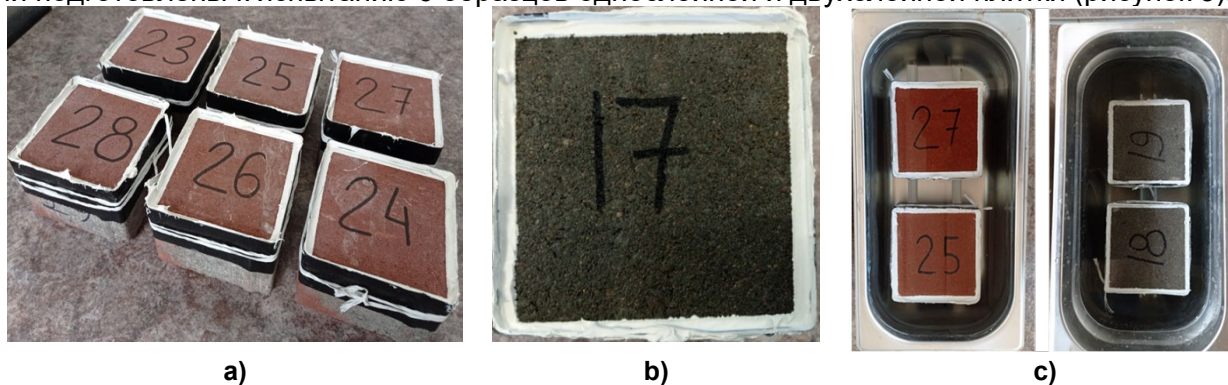
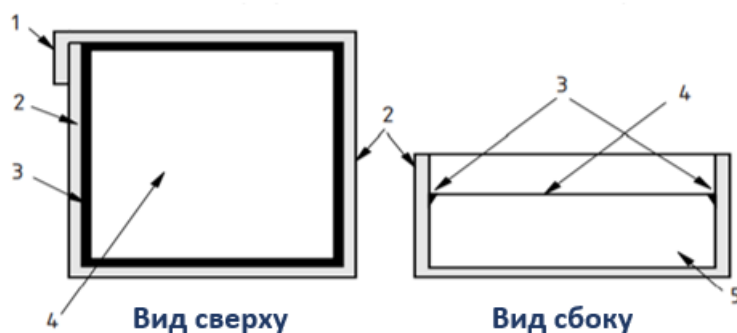


Рис. 3 Подготовка к испытанию образцов тротуарной плитки первой группы согласно методике ГОСТ 17608 Приложение Е: а, b – общий вид образцов плитки первой группы; с – насыщение образцов плитки водным раствором хлорида натрия
Fig. 3 Preparation for testing samples of paving flags according to GOST 17608 Appendix E: a, b – general view of samples; c – the samples, immersed in a 3 % sodium chloride (NaCl) solution

На образцах однослойной и двухслойной плитки **второй группы** выполнялась наклейка самоклеящейся бутилкаучуковой ленты ко всем поверхностям, кроме лицевой (испытательной) поверхности, согласно схеме представленной на рисунке 4. Вверх ленты возвышался над лицевой поверхностью на 20 ± 2 мм. По периметру лицевой поверхности образца выполнялась герметизация фасок, чтобы исключить проникновение и вытекание водного раствора хлорида натрия с лицевой поверхности образца в зону между лентой и поверхностью образца.



1 – Стык внахлест; 2 – Бутилкаучуковая лента; 3 – Полиуретановый герметик;
4 – Лицевая поверхность; 5 – Образец

1 – Overlap; 2 – Rubber sheet; 3 – Sealant string; 4 – Test surface; 5 – Specimen

Рис. 4 Схема наклейки бутилкаучуковой ленты к бетонной поверхности образца и заполнение фаски герметиком по периметру

Fig. 4 An example of a specimen with the rubber sheet and a sealant string

Подготовленные образцы плитки **второй группы** насыщали 5-процентным водным раствором хлорида натрия температурой 20 ± 2 °С, наливая на лицевую поверхность слой раствора толщиной около 5 ± 2 мм (рисунок 5, а). Насыщение образцов продолжалось в течение 96 часов при температуре воздуха 20 ± 2 °С.

Перед испытанием на замораживание и оттаивание насыщенные образцы плитки **второй группы** устанавливали в теплоизоляционные кассеты (см. рисунок 5, б). Теплоизоляционные кассеты выполнены таким образом, чтобы образцы подвергались воздействию температуры при замораживании и оттаивании только с одной стороны. В качестве материала для изготовления теплоизоляционных кассет использовали плиты из экструдированного пенополистирола толщиной 20 ± 1 мм и средней плотностью 18 ± 2 кг/м³.

Образцы плитки **второй группы** в теплоизоляционных кассетах со слоем 5-процентного водного раствора хлорида натрия на лицевой поверхности накрыли полиэтиленовой пленкой для предотвращения испарения раствора в период испытания (рисунок 5, с).



а)



б)



с)

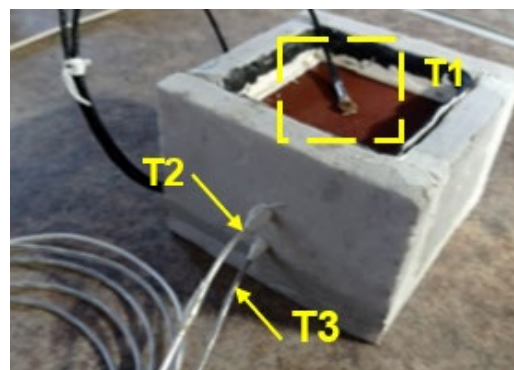
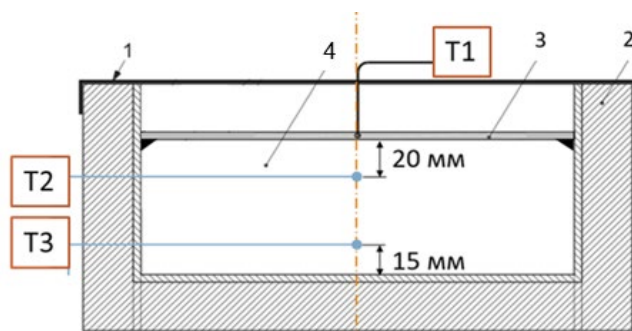
Рис. 5 Подготовка к испытанию образцов тротуарной плитки второй группы согласно разработанной методике: а – насыщение образцов второй группы; б – теплоизоляционная кассета; с – общий вид образцов второй группы перед установкой в морозильную камеру
Fig. 5 Preparation for testing samples of paving flags of the second group according to the developed test method: a – saturation 3 % sodium chloride (NaCl) solution of samples of the second group; b – thermal insulation container; c – general view of samples of the second group before installation in the freezer

Подготовленные образцы первой и второй группы помещали вместе в морозильную камеру TX 500 (производитель ООО «СМ Климат», Санкт-Петербург, Российская Федерация) для каждого вида плитки в отдельности и испытывали на попеременное замораживание и оттаивание (см. рисунок 6).



Рис. 6 Морозильная камера TX 500 и общий вид образцов в камере
Fig. 6 Freezer and general view of samples in the chamber

В период испытания выполнялось измерение температуры водного раствора хлорида натрия в контейнере с образцами первой группы и на лицевой поверхности плитки для одного образца второй группы. Дополнительно для образцов второй группы, которые подвергались одностороннему воздействию температур, устанавливали датчики температуры по высоте сечения согласно рисунку 7. Измерение температуры ввелось с применением термодатчиков – термосопротивление Pt100 (производитель ООО «ОВЕН», Москва, Российская Федерация).



a)

b)

1 – Полиэтиленовая пленка; 2 – Теплоизоляционная кассета; 3 – Водный раствор хлорида натрия на лицевой поверхности; 4 – Образец; T1, T2, T3 – датчики температуры
1 - Polyethylene sheet; 2 – Thermal insulation container; 3 – 3 % sodium chloride (NaCl) solution; 4 – Specimen; T1, T2, T3 – Temperature measuring device

Рис. 7 Образец второй группы с датчиками температуры: а – схема; б – общий вид
Fig. 7 Sample of the second group with temperature measuring device: a – schematic representation; b – general view

Температурный режим испытания для образцов первой и второй группы был получен на морозильной камере TX 500 с внутренним объемом 0.49 м³ и количеством образцом в камере 13 штук и представлен на рисунках 8 и 9.

Фактический температурный режим испытания для образцов первой группы согласно ГОСТ 17608–2017 [24] уточнялся в зависимости от загрузки и технических характеристик камеры. Стоит отметить, что на фактический температурный цикл существенное влияние оказывает количество образцов в одном контейнере, чем меньше образцов в одном контейнере, тем меньше продолжительность замораживания и оттаивания водного раствора хлорида натрия в период испытания.

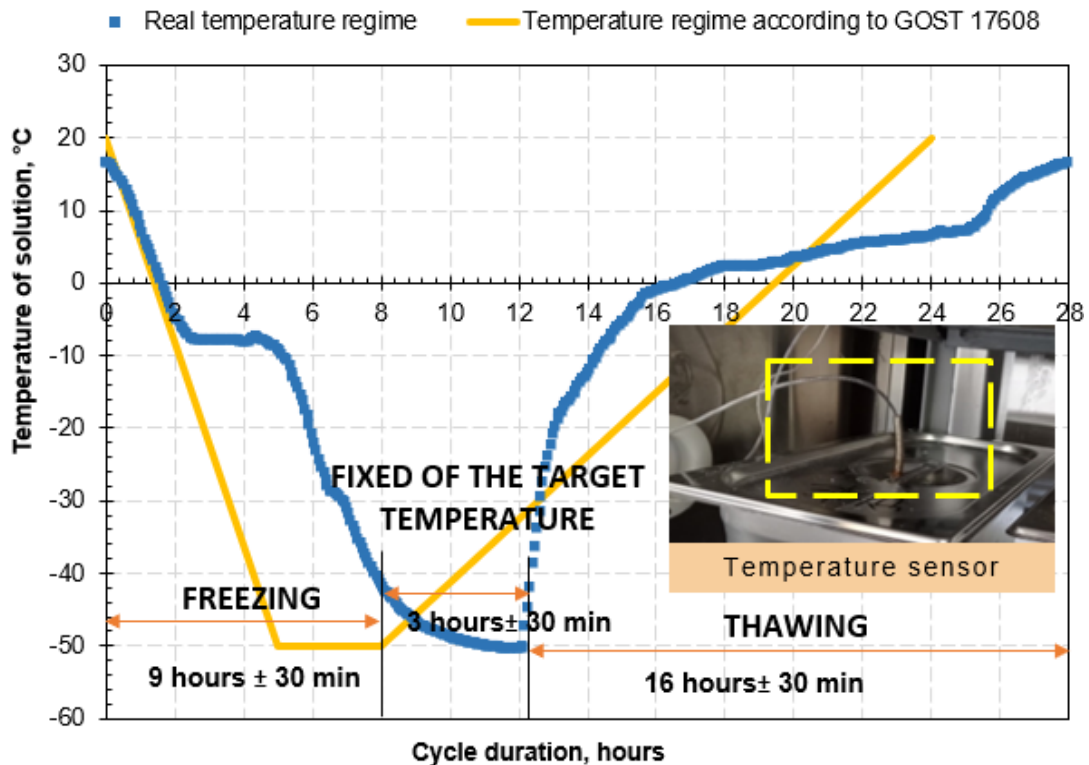


Рис. 8 Температурный режим испытания для образцов плитки первой группы
 Fig. 8 Time-temperature cycle for tile samples of the first group

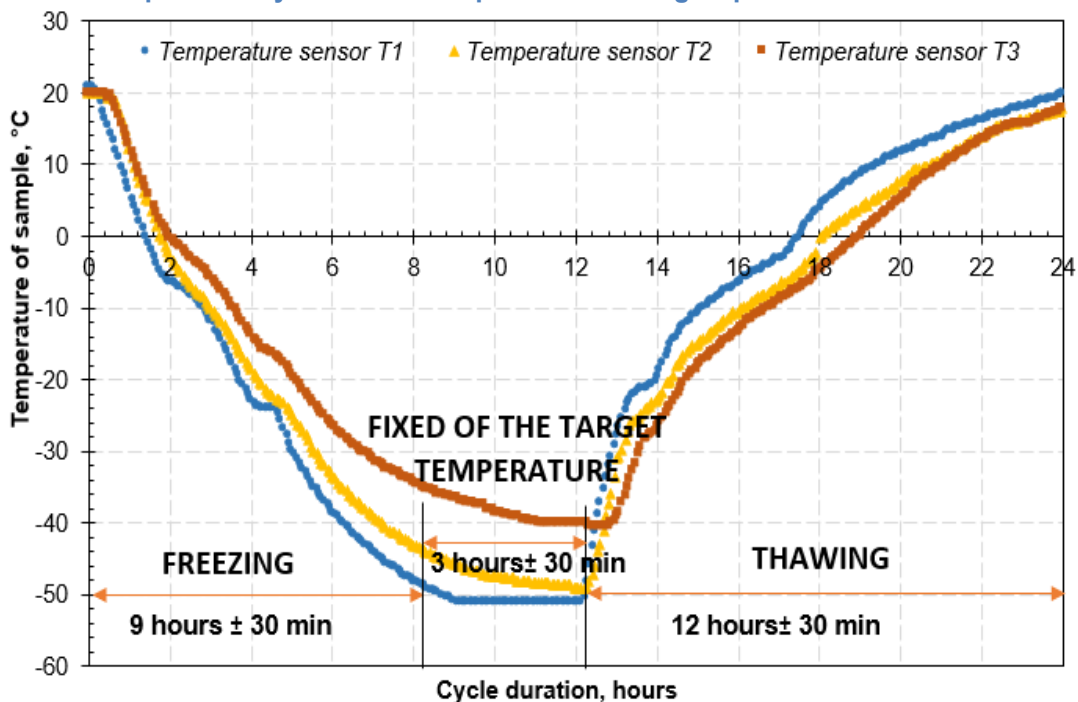


Рис. 9 Температурный режим испытания для образцов плитки второй группы
 Fig. 9 Time-temperature cycle for tile samples of the second group

Критерием оценки состояния образцов тротуарной плитки первой и второй группы после 20 циклов замораживания и оттаивания являлось количество материала, отделившегося от лицевой поверхности (шелушение), которое рассчитывалось по формуле

$$m_{cp} = \frac{\sum m}{A}, \tag{1}$$



где $\sum m$ – это общее количество материала, отделившегося от 6 образцов после 20 циклов испытаний, в граммах; A – это суммарная общая площадь лицевой поверхности 6 образцов, м².

3 Results and Discussion

Количество отделившегося от лицевой поверхности материала после 20 циклов для образцов первой группы однослойной плитки, которые подвергались объемному замораживанию и оттаиванию, составило 118.105 г/м². Коэффициент вариации составил 29%. Одностороннее замораживание и оттаивание образцов второй группы однослойной плитки после 20 циклов испытаний привело к полному разрушению лицевой поверхности (т. е. определить шелушение лицевой поверхности не представлялось возможным). Результаты испытания однослойной плитки представлены в таблице 3 и на рисунке 10.

Таблица 3. Результаты определения шелушения лицевой поверхности однослойной плитки образцов первой группы
Table 3. Surface scaling of specimen of the first group of the single layer paving flags after 20 freeze–thaw cycles

Номер образца	Площадь лицевой поверхности, м ²	Масса отделившихся частиц от лицевой поверхности, г	Шелушение, г/м ²
17	0.0077	0.650	84.080
18	0.0079	1.272	160.591
19	0.0077	0.741	95.688
20	0.0077	0.871	112.645
21	0.0079	1.263	159.360
22	0.0079	0.750	94.773
<i>Суммарное значение</i>	0.0470		∑ 118.105

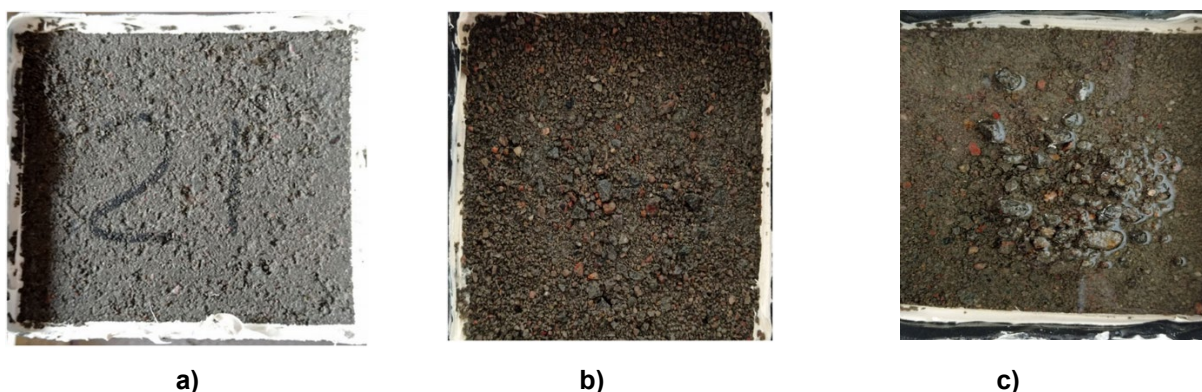


Рис. 10 Общий вид лицевой поверхности однослойной плитки после 20 циклов замораживания и оттаивания: а – образцов первой группы; б, с – образцов второй группы
Fig. 10 Surface scaling of specimen of the single layer paving flags after 20 freeze–thaw cycles: a – samples of the first group; b, c – samples of the second group

Одностороннее замораживание однослойной плитки по сравнению с объемным привело к развитию значительных градиентов температуры по высоте образцов плитки (рисунок 9), которые стали причиной значительных структурных повреждений. Наибольшая разница значений температур между лицевой и противоположной (тыльной) поверхностями достигала около 15°C в период замораживания.

Шелушение лицевой поверхности двухслойной плитки после 20 циклов для образцов первой группы составило 38.537 г/м² (коэффициент вариации 19%), для второй группы образцов 28.203 (коэффициент вариации 16%). Результаты испытания двухслойной плитки представлены в таблицах 4 и 5, на рисунке 11.

Способ замораживания и оттаивания (односторонний и объемный) образцов двухслойной плитки не оказал существенного влияния на результаты испытания. При этом шелушение лицевой поверхности первой и второй группы было небольшим. Это можно объяснить



присутствием гидрофобизирующей добавки в бетоне лицевого слоя двухслойной тротуарной плитки, которая препятствовала насыщению бетона лицевого слоя водным раствором хлорида натрия, и как следствие снизила количество повреждений на лицевой поверхности плитки. Поэтому стойкость к морозному разрушению двухслойной тротуарной плитки будет определяться внутренними повреждениями в бетоне основного слоя. В данной работе исследование внутренних повреждений не проводилось.

Таблица 4. Результаты определения шелушения лицевой поверхности двухслойной плитки образцов первой группы

Table 4. Surface scaling of specimen of the first group of the double layer paving flags after 20 freeze-thaw cycles

Номер образца	Площадь лицевой поверхности, м ²	Масса отделившихся частиц от лицевой поверхности, г	Шелушение, г/м ²
23	0.0073	0.33	44.93
24	0.0078	0.21	26.58
25	0.0077	0.34	44.38
26	0.0076	0.33	42.74
27	0.0073	0.30	40.89
28	0.0074	0.24	32.08
Суммарное значение	0.0451		Σ 38.54

Таблица 5. Результаты определения шелушения лицевой поверхности двухслойной плитки образцов второй группы

Table 5. Surface scaling of specimen of the second group of the double layer paving flags after 20 freeze-thaw cycles

Номер образца	Площадь лицевой поверхности, м ²	Масса отделившихся частиц от лицевой поверхности, г	Шелушение, г/м ²
17	0.0074	0.25	34.03
18	0.0073	0.20	27.40
19	0.0072	0.20	27.40
20	0.0068	0.22	32.73
21	0.0074	0.19	25.66
22	0.0069	0.15	21.91
Суммарное значение	0.0431		Σ 28.20



a)



b)

Рис. 11 Общий вид лицевой поверхности двухслойной плитки после 20 циклов замораживания и оттаивания: а – образцов первой группы; б – образцов второй группы

Fig. 11 Surface scaling of specimen of the double layer paving flags after 20 freeze-thaw cycles: a – samples of the first group; b, c – samples of the second group



4 Conclusions

Проведены сравнительные испытания по изучению влияния способов замораживания и оттаивания (объемного и одностороннего) на морозостойкость бетона вибропрессованной тротуарной плитки. Полученные результаты испытаний позволяют заключить следующие:

1. Способ замораживания и оттаивания образцов оказывает существенно влияет на морозостойкость бетона.
2. Одностороннее замораживание и оттаивание образцов тротуарной плитки привело к появлению градиентов температуры по высоте изделия, что моделирует более суровые условия эксплуатации, чем при объемном (всестороннем) воздействии температур.
3. Наличие гидрофобизирующих добавок в бетоне лицевого слоя двухслойной тротуарной плитки значительно снижает шелушение лицевой поверхности. Поэтому морозостойкость двухслойной тротуарной плитки будет определяться внутренними повреждениями бетона основного слоя. В данной работе исследование внутренних повреждений не проводилось.
4. Оценка морозостойкости бетона тротуарной плитки по разработанной методика одностороннего замораживания и оттаивания требует дальнейшего изучения.

References

- 1 Maslova, E.E., Barmin, A.A., Zhigailo, I. V. and Staroverov, V.D. (2020) Trotuarnye Izdeliya: Tekhnicheskie i Tekhnologicheskie Osobennosti [Paving Products: Technical and Technological Features]. *Bulletin of Civil Engineers.*, **1**, Pp. 254-259. <https://elibrary.ru/spkwhs>.
- 2 International Technical Standard GOST 10060-2012, Concretes. Methods for Determination of Frost-Resistance. Publ., Standartinform, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1200100906>.
- 3 Gorchakov, G.I., Kapkin, M.M. and Skramtaev, B.G. (1965) Povyshenie Morozostojkosti Betona [Increasing the Frost Resistance of Concrete]. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005874140> (date of application: 14.03.2023).
- 4 Wang, R., Hu, Z., Li, Y., Wang, K. and Zhang, H. (2022) Review on the Deterioration and Approaches to Enhance the Durability of Concrete in the Freeze–Thaw Environment. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **321**, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126371>.
- 5 Ebrahimi, K., Daiezadeh, M.J., Zakertabrizi, M., Zahmatkesh, F. and Habibnejad Korayem, A. (2018) A Review of the Impact of Micro- and Nanoparticles on Freeze-Thaw Durability of Hardened Concrete: Mechanism Perspective. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **186**, 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.029>.
- 6 Zheng, X., Wang, Y., Zhang, S., Xu, F., Zhu, X., Jiang, X., Zhou, L., Shen, Y., Chen, Q., Yan, Z., Zhao, W., Zhu, H. and Zhang, Y. (2022) Research Progress of the Thermophysical and Mechanical Properties of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **330**, 127254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127254>.
- 7 Ding, Z., Quy, N.X., Kim, J. and Hama, Y. (2022) Evaluations of Frost and Scaling Resistance of Fly Ash Concrete in Terms of Changes in Water Absorption and Pore Structure under the Accelerated Carbonation Conditions. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **345**, 128273. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128273>.
- 8 Hasholt, M.T., Christensen, K.U. and Pade, C. (2019) Frost Resistance of Concrete with High Contents of Fly Ash - A Study on How Hollow Fly Ash Particles Distort the Air Void Analysis. *Cement and Concrete Research*, Pergamon, **119**, 102–112. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.02.013>.
- 9 Wang, L., Huang, Y., Zhao, F., Huo, T., Chen, E. and Tang, S. (2022) Comparison between the Influence of Finely Ground Phosphorous Slag and Fly Ash on Frost Resistance, Pore Structures and Fractal Features of Hydraulic Concrete. *Fractal and Fractional*, MDPI, **6**. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT6100598>.
- 10 Jaworska-Wędzińska, M. and Jasińska, I. (2022) Durability of Mortars with Fly Ash Subject to Freezing and Thawing Cycles and Sulfate Attack. *Materials*, **15**. <https://doi.org/10.3390/ma15010220>.



- 11 ASTM C618-22 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 5. <https://doi.org/10.1520/C0618-22>.
- 12 Wang, D., Zhou, X., Meng, Y. and Chen, Z. (2017) Durability of Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume against Combined Freezing-Thawing and Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **147**, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.172>.
- 13 Karakurt, C. and Bayazit, Y. (2015) Freeze-Thaw Resistance of Normal and High Strength Concretes Produced with Fly Ash and Silica Fume. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**. <https://doi.org/10.1155/2015/830984>.
- 14 Bumanis, G., Dembovska, L., Korjamins, A. and Bajare, D. (2018) Applicability of Freeze-Thaw Resistance Testing Methods for High Strength Concrete at Extreme $-52.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and Standard $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ Testing Conditions. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **8**, 139–149. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2018.01.003>.
- 15 Ding, Z., Quy, N.X., Noguchi, T., Kim, J. and Hama, Y. (2022) A Study on the Change in Frost Resistance and Pore Structure of Concrete Containing Blast Furnace Slag under the Carbonation Conditions. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **331**, 127295. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127295>.
- 16 Zhang, W., Na, S., Kim, J., Choi, H. and Hama, Y. (2017) Evaluation of the Combined Deterioration by Freeze–Thaw and Carbonation of Mortar Incorporating BFS, Limestone Powder and Calcium Sulfate. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Kluwer Academic Publishers, **50**, 1–12. <https://doi.org/10.1617/S11527-017-1039-1/FIGURES/11>.
- 17 Kessler, S., Thiel, C., Grosse, C.U. and Gehlen, C. (2017) Effect of Freeze–Thaw Damage on Chloride Ingress into Concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Kluwer Academic Publishers, **50**, 1–13. <https://doi.org/10.1617/S11527-016-0984-4/FIGURES/10>.
- 18 Skripkiunas, G., Nagrockiene, D., Girskas, G., Vaičiene, M. and Baranauskaite, E. (2013) The Cement Type Effect on Freeze – Thaw and Deicing Salt Resistance of Concrete. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **57**, 1045–1051. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.04.132>.
- 19 Şahin, Y., Akkaya, Y. and Taşdemir, M.A. (2021) Effects of Freezing Conditions on the Frost Resistance and Microstructure of Concrete. *Construction and Building Materials*, **270**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121458>.
- 20 Jacobsen, S., Sæther, D.H. and Sellevold, E.J. (1997) Frost Testing of High Strength Concrete: Frost/Salt Scaling at Different Cooling Rates. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Kluwer Academic Publishers, **30**, 33–42. <https://doi.org/10.1007/BF02498738/METRICS>.
- 21 Fagerlund, G. (1977) The International Cooperative Test of the Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete. *Matériaux et Constructions*, Kluwer Academic Publishers, **10**, 231–253. <https://doi.org/10.1007/BF02478694/METRICS>.
- 22 Thanaraj, D.P., Anand, N. and Arulraj, P. (2019) Experimental Investigation of Mechanical Properties and Physical Characteristics of Concrete under Standard Fire Exposure. *Journal of Engineering, Design and Technology*, **17**. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2018-0159>.
- 23 Wang, K., Nelsen, D.E. and Nixon, W.A. (2006) Damaging Effects of Deicing Chemicals on Concrete Materials. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **28**, 173–188. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2005.07.006>.
- 24 International Technical Standard GOST 17608-2017 Concrete Paving Slabs. Specifications. Publ., Standartinform, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1200157324>.
- 25 EN 1339:2003 - Concrete Paving Flags - Requirements and Test Methods. European committee for standardization, 68. <https://docs.cntd.ru/document/431972143>.
- 26 ASTM C1645-21 Standard Test Method for Freeze-Thaw and De-Icing Salt Durability of Solid Concrete Interlocking Paving Units. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 3. <https://doi.org/10.1520/C1645-21>.