

УДК: 691.327-431  
DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_86  
EDN: FUMXDN



## Проблемы высолообразования в бетонных вибропрессованных тротуарных плитах

О.В. Хохряков<sup>1</sup>, Е.Г. Гуляков<sup>1</sup>, В.Г. Хозин<sup>1</sup>, А.Ю. Беляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** В настоящее время бетонные изделия для покрытий тротуаров активно применяются в благоустройстве. Их отличает выразительность, простота производства и укладки, различная цветовая гамма, а также широкая номенклатура. На протяжении всего времени эксплуатации изделия находятся под влиянием многих видов воздействий, к которым относятся осадки, солнечное облучение, высушивание, попеременное замораживание и оттаивание, механический износ, противогололедные реагенты и т.д. Чаще всего на лицевой поверхности появляются дефекты в виде выцветов и высолообразований, хотя их наличие не влияет на физико-механические свойства, однако снижает эстетическое качество. Целью данного исследования является анализ современных данных и проведение физико-химических испытаний бетона тротуарных плит для выявления причин высолообразования и изменения их цвета. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ литературных данных о причинах высолообразования в цементобетонных изделиях.
2. Определить изменение цвета бетонных плит;
3. Провести сравнительные микроскопические исследования поверхности бетонных плит;
4. Изучить рН-среды водного раствора, в котором находились образцы бетона;
5. Провести качественную оценку высолообразования;
6. Определить содержание ионов хлора в бетонных плитах.

**Результаты.** В результате исследований были определены основные факторы, вызывающие высолообразование и изменение цвета тротуарных плит. При сравнении внешнего вида эталонных изделий с образцами, отобранными с объекта, выявлена повышенная разница в цвете их поверхности между ними. Выявлена основная причина высолообразования – выщелачивание гидратной извести, которое дополняется также миграцией на поверхность активных веществ при действии влаги на изделия вследствие их повышенной пористости. На основании результатов исследования разработаны рекомендации по корректировке технологии производства тротуарных плит.

**Выводы.** Ценность результатов состоит в выявлении факторов, приводящих к высолообразованию и изменению цвета бетонных плит, и в обосновании способов их устранения.

**Ключевые слова:** бетон, высолообразование, мелкозернистый цементный бетон, плиты для тротуаров, вибропрессованные плиты

**Для цитирования:** Хохряков О.В., Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Беляков А.Ю. Проблемы высолообразования в бетонных вибропрессованных тротуарных плитах // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 86-100, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_86, EDN: FUMXDN

# Problems of efflorescence in concrete vibro-pressed paving slabs

O.V. Khokhryakov<sup>1</sup>, E.G. Gulyakov<sup>1</sup>, V.G. Khozin<sup>1</sup>, A.Yu. Belyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** Currently, concrete products for sidewalk coverings are actively used in landscaping. They are distinguished by their expressiveness, ease of production and installation, different colors, as well as a wide range. Throughout the entire period of operation, the products are under the influence of many types of influences, which include precipitation, solar radiation, drying, alternating freezing and thawing, mechanical wear, de-icing reagents, etc. Most often, defects appear on the front surface in the form of efflorescence and discoloration, although their presence does not affect the physical and mechanical properties, but reduces the aesthetic quality. The purpose of this study is to analyze modern data and conduct physical and chemical tests of concrete paving slabs to identify the causes of efflorescence and changes in their color. To achieve this goal, the following tasks were identified:

1. Perform an analysis of literature data on the causes of efflorescence on cement concrete products.
2. Determine the color change of concrete slabs;
3. Conduct comparative microscopic studies of the surface of concrete slabs;
4. Study the pH environment of the aqueous solution in which the concrete samples were located;
5. Conduct a qualitative assessment of efflorescence;
6. Determine the content of chlorine ions in concrete slabs.

**Results.** As a result of the research, the main factors causing efflorescence and discoloration of paving slabs were identified. When comparing the appearance of reference products with samples taken from the site, an increased difference in the color of their surface was revealed between them. The main cause of efflorescence has been determined - leaching of hydrated lime, which is also supplemented by the migration of active substances to the surface when moisture acts on the products due to their increased porosity. Based on the results of the study, recommendations were developed for adjusting the production technology of paving slabs.

**Conclusions.** The value of the results lies in identifying the factors leading to efflorescence and discoloration of concrete slabs, and in justifying ways to eliminate them.

**Key words:** concrete, efflorescence, fine-grained cement concrete, slabs for sidewalks, vibropressed slabs

**For citation:** Khokhryakov O.V., Gulyakov E.G., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Problems of efflorescence in concrete vibro-pressed paving slabs // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 86-100, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_86, EDN: FUMXDN

## 1. Введение

Причины высолообразования на поверхности бетонных изделий подразделяются по времени появления – на первичные и вторичные. Первичные высолы проявляются в процессе структурообразования бетона на ранней стадии твердения. Вторичные связаны с миграцией влаги с водорастворимыми солями на лицевую поверхность изделий в период их эксплуатации.

К основным факторам, приводящим к высолообразованию на поверхности бетона [1], относят:

1. Состав и свойства сырьевых материалов, используемых для приготовления бетона;
2. Структура бетона;
3. Технология прессования изделий и организация складского хранения;
4. Воздействие внешних факторов.

Основным компонентом, из-за которого на поверхности изделий появляются т.н. белесые отложения, является цементное вяжущее. Как правило, в качестве такого применяется высокоактивный бездобавочный портландцемент класса по прочности на сжатие не ниже 42,5. Его расход для мелкозернистого бетона лицевого слоя принимается весьма высоким, ориентировочно - 440-460 кг на 1 м<sup>3</sup>. При этом современные портландцементы выпускаются с относительно большим содержанием минерала алита и обладают повышенной тониной помола 360-420 м<sup>2</sup>/кг.

Всё это приводит к образованию высокой доли «балластной» гидролизной извести Са(ОН)<sub>2</sub> (портландит), которая выделяется в процессе гидратации портландцемента и откладывается в несвязанном виде в порах и межзерновых прослойках цементного камня [2]. Атмосферная влага, попадающая на поверхность бетона, приводит к растворению Са(ОН)<sub>2</sub> и постепенной её миграции в направлении воздействия этой влаги – к лицевой поверхности изделия. После испарения влаги портландит, имея природный белый цвет, создает на поверхности бетона выцветы (высолы) [3]. Процесс их появления справедливее назвать выщелачиванием, а не высолообразованием. При длительном нахождении на поверхности бетонных изделий известь карбонизируется под воздействием углекислого газа с образованием нерастворимого СаСО<sub>3</sub> [4,5]. Он переходит в более растворимый бикарбонат кальция Са(НСО<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, однако это процесс протекает в течение весьма длительного периода времени.

Для уменьшения доли свободного портландита принято вводить в состав бетона активные минеральные добавки (микрокремнезем, зола-уноса и др.) [6,7,8]. Они связывают его в нерастворимые гидросиликаты кальция по пуццолановому механизму взаимодействия [9,10]. Однако эта химическая реакция при нормальных условиях протекает очень медленно, что не позволяет в полной мере избавиться от белесых щелочных налётов на поверхности бетонных изделий [11].

Для борьбы с высолообразованием в качестве вяжущего для бетона рекомендуется использовать цементы типа ЦЕМ II...V, которые содержат в своём составе различные минеральные добавки. Несмотря на это, из-за низкой активности этих цементов на ранней стадии твердения и, соответственно, замедленного темпа набора прочности бетона, практического применения данный способ не нашёл. Эффективным можно было бы считать применение карбонатных цементов низкой водопотребности [12].

Иные водорастворимые соединения, например, оксиды щелочных металлов, содержащиеся в цементе и заполнителях, или соли, находящиеся в воде затворения, не оказывают существенного влияния на высолообразование, поскольку содержание этих веществ незначительно.

Вторым негативным фактором, ускоряющим высолообразование на поверхности бетона, является неоднородная структура бетона с повышенной открытой и капиллярной пористостью. Главным образом, это связано с нерационально подобранным гранулометрическим составом заполнителей, повышенным водоцементным отношением, высокой удельной поверхностью цемента и пр. Относительно низкая плотность ускоряет миграцию влаги с растворенными в ней солями через «тело» бетона [12,13]. В связи с этим рекомендуется проектировать состав бетона с наиболее плотной структурой, при которой минимизируется объем поровой жидкости, способной к мигрированию к поверхности изделия при высушивании.

Третий фактор, приводящий к появлению высолов (выцветов) на поверхности изделий, связан с технологией их формования. Дело в том, что нарушение режима прессования может привести к недоуплотнению бетона, вследствие чего его структура приобретает повышенную пористость [14,15]. Как и в предыдущем случае это ускоряет процесс массопереноса влаги через «тело» бетона с закономерным образованием высолов на поверхности изделий [16].

Высолообразование также происходит при неблагоприятных условиях хранения на складе готовой продукции. Например, быстрая упаковка свежесформованных изделий в стрейч-пленку провоцирует значительное образование конденсата. А ненадежное укрытие или прокол этой пленки приводит к прямому попаданию атмосферной влаги на изделия. В результате высолы на них проявляются до отгрузки потребителю. Наибольшему высолообразованию в транспортной паллете подвержены те участки, из

которых влага удаляется относительно дольше [17]. Это касается мест соприкосновения изделий, а также нижних рядов паллеты.

Четвертый фактор, приводящий к опасности высолообразования, главным образом, связан с внешними воздействиями, которые возникают по разным причинам. Например, известно, что значительное содержание солей-электролитов может находиться в грунтовой влаге (сульфатные, хлористые и др.). С другой стороны, карбонатные соли могут проникать в бетонные изделия из щебня осадочного происхождения, который засыпают в декоративных целях вблизи уложенного тротуарного покрытия. В-третьих, в холодный период года эти покрытия подсыпают антигололёдными реагентами, представляющими собой смесь неорганических солей. Возможна миграция щелочных соединений (портландита, соли натрия и калия) или противоморозных солей на поверхность бетонных изделий из подстилающих монтажных слоёв, изготавливаемых из цементного раствора. Немаловажно создавать уклоны или дренажные системы тротуарных покрытий, чтобы вода не застаивалась и не провоцировала образование высолов.

Как следует из выполненного обзора, причин, приводящих к негативному появлению высолов на поверхности бетонных изделий, множество. Очевидно, что для устранения потенциальных разногласий и спорных моментов Заказчик и завод-изготовитель должны своевременно учитывать все вышеприведенные факторы, как на стадии производства изделий [18,19], так и при укладке и эксплуатации тротуарного покрытия.

Цель данного исследования – выявить причину высолообразования, изменения цвета плит бетонных тротуарных и разработать рекомендации по их предотвращению.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ причин высолообразования на поверхности цементобетонных плит. Привести требования современной нормативной документации;
2. Определить изменение цвета бетонных плит колориметрическим методом;
3. Провести сравнительные микроскопические исследования поверхности бетонных плит;
4. Смоделировать условия эксплуатации плит на образцах мелкозернистого бетона и изучить pH-среды водного раствора, в котором они находились;
5. Провести качественную оценку высолообразования маркерным фенолфталеиновым раствором.
6. Определить содержание ионов хлора в бетонных плитах.

## 2. Материалы и методы

Бетонные плиты (эталонные) представляют собой двухслойные изделия. Верхний гладкий лицевой слой – пигментированный мелкозернистый бетон с декоративными заполнителями, который был механически обработан путем ступенчатого абразивного шлифования. Нижний несущий слой – подосновный мелкозернистый бетон серого цвета без декоративных заполнителей и поверхностной обработки. На боковых гранях предусмотрены шовообразователи для удобства укладки смежных изделий. Плиты имеют прямоугольную конфигурацию длиной 600 мм, шириной 300 мм и толщиной 80 мм. Толщина лицевого слоя варьируется в интервале 5-10 мм. Плиты изготовлены методом вибропрессования, условия твердения – нормальные. Цвет лицевого слоя плит: черный, белый, серый.

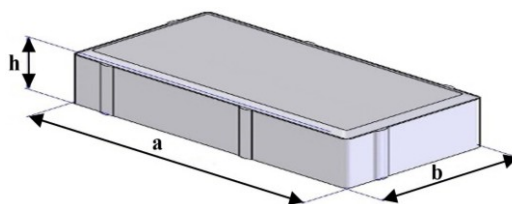


Рис. 1. Внешний вид бетонных плит (иллюстрация авторов)  
Fig. 1. Appearance of concrete slabs (illustration by the authors)

Бетонные плиты (основные) по внешнему виду и геометрическим размерам соответствуют эталонным, однако визуально имеют внешние эстетические дефекты. Во-первых, белесые солевые образования, которые в хаотичном порядке проступили на лицевой поверхности изделий. Во-вторых, потеря первоначального заводского цвета верхнего лицевого слоя, который стал тусклым и невыразительным.

Для испытаний были предоставлены материалы с завода-изготовителя. В табл. 1 представлены расходы сырьевых материалов для нижнего несущего и верхнего лицевого слоев плит (белый).

Таблица 1

Составы мелкозернистых бетонных смесей верхнего и нижнего слоев плит

Тип компонента	Расход материала, кг/м <sup>3</sup>	
	для нижнего несущего слоя	для верхнего лицевого слоя
Портландцемент серый (ПЦ)	360	-
Портландцемент белый (БЦ)	-	450
Песок кварцевый обогащенный (ПК)	1500	450
Щебень гранитный фр. 4-8 мм (ЩГ)	500	-
Отсев гранитный фр. 2-5 мм	-	35
Песок кварцевый мелкий ( $M_k=0,8-1,1$ )	-	620
Мрамор белый фр.3-5 мм	-	80
Мрамор серый фр.3-5 мм	-	300
Мрамор серый фр.5-10 мм	-	170
Пигмент белый	-	22,5
Добавка Муран 19	1,7	-
Добавка Муран 17	-	1,7
Вода затворения (В/Ц=34 %)	122	153

Согласно нормативно-технической документации завода-изготовителя, изделия имеют следующую область применения: устройство и мощение сборных покрытий тротуаров, пешеходных и садово-парковых дорожек, эксплуатируемых кровель зданий и сооружений, газонов, пешеходных площадей и посадочных площадок общественного транспорта, территорий для стоянки автотранспорта, велосипедных дорожек, улиц с малоинтенсивным движением и др.

Первоначально была выполнена сравнительная оценка изменения цвета бетонных плит за время их эксплуатации. Для этого был использован Колориметр CR20 (рис. 2), в устройстве которого применена геометрия измерения 45/0, которая максимально приближена к человеческому восприятию.



Рис. 2 – Схема установки Колориметра при измерении (иллюстрация авторов)

Fig. 2 – Scheme of installation of the Colorimeter during measurement (illustration by the authors)

Колориметр работает в системе CIELab, в которой каждый цвет описан тремя числами, обозначающими его положение в трёхмерном пространстве. Первое число или величина L указывает на уровень яркости цвета. Второе и третье число (a и b) определяют собственно оттенок. Светлота задана координатой L (изменяется от 0 до 100, то есть от самого темного до самого светлого), хроматическая составляющая – двумя декартовыми координатами a (цвета в диапазоне от зелено-голубого до красно-

малинового) и  $b$  (цвета в диапазоне от голубого до желтого). При этом разница в цветах между измеряемыми эталоном и образцом вычисляется по «формуле цветового различия», которая является математическим представлением, позволяющим численно выразить различие между двумя цветами в колориметрии.

Цветоразность вычисляется по формуле, используя координаты эталонного  $(L_1^*, a_1^*, b_1^*)$  и основного  $(L_2^*, a_2^*, b_2^*)$  образцов в цветовом пространстве  $L^*a^*b^*$ :

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

Если значение  $\Delta E_{ab}^*$ , показываемое на интерфейсе прибора, превышает 2,3 [20], то цветоразница между измеряемыми участками эталонных и основных образцов высокая и различается невооруженным глазом.

На рис. 3 представлена схема точек расположения колориметра для оценки цветового различия эталонных и основных образцов. Измерения проводили попарно в семи разных точках для бетонных плит белого и черного цветов.

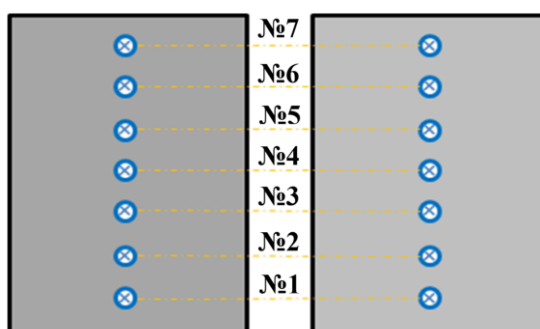


Рис. 3 – Схема расположения точек для замера цветового различия  
слева – эталонный образец, справа – основной образец (иллюстрация авторов)

Fig. 3 – Scheme of points for measuring color differences  
left – reference sample, right – basic sample (illustration by the authors)

Изучение состояния поверхности эталонных бетонных плит, предоставленных заводом-изготовителем и плит, отобранных с объекта, осуществляли по микрофотографиям, полученных с помощью микроскопа Dewang CSW02-1000X.

С помощью расчетно-экспериментального метода проанализированы два состава бетона, которые были переданы заводом-изготовителем (табл. 1). Расчет бетона нижнего несущего слоя выполнялся по следующей схеме. Для начала определяется объем цементного теста (л) в  $1 \text{ м}^3$  бетона плит по формуле:

$$V_{\text{цт}} = \text{ПЦ} / \rho_{\text{ц}} + В, \quad (2)$$

где: ПЦ – расход серого цемента;

$\rho_{\text{ц}}$  – истинная плотность цемента, кг/л;

В – расход воды на  $1 \text{ м}^3$ .

Содержание вовлеченного воздуха не учитывали, поскольку по ГОСТ 17608-2017 для изделий, изготавливаемых методом вибропрессования, оно не нормируется.

Далее выполнялся расчет пустотности (%) смеси обогащенного песка и щебня гранитного:

$$П = (1 - \rho_{\text{см}} / \rho) \cdot 100, \quad (3)$$

$$\rho = k_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} + k_{\text{щ}} \cdot \rho_{\text{щ}}, \quad (4)$$

где:  $\rho_{\text{щ}}$  – истинная плотность гранитного щебня равная 2,7 кг/л;

$\rho_{\text{п}}$  – истинная плотность обогащенного песка равная 2,65 кг/л;

$\rho$  – усредненная истинная плотность смеси песка и щебня, кг/л;

$k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{щ}}$  – доли песка и щебня в их смеси.

$\rho_{\text{см}}$  – насыпная плотность смеси песка и щебня в уплотненно-вибрированном состоянии равная 1,89 кг/л.

Плотность  $\rho_{\text{см}}$  определяется экспериментально по методике ГОСТ 8735-88 (п. 9.1) с тем отличием, что тщательно перемешанная смесь песка и щебня не насыпалась совком в

предварительно взвешенный мерный цилиндр с высоты 10 см, а виброуплотнялась в нём для максимального заполнения.

Расчет объема (л) смеси песка и щебня  $V$  в уплотненно-вибрированном состоянии выполнялся по формуле:

$$V = (\text{ПК} + \text{ЩГ}) / \rho_{\text{см}}, \quad (6)$$

где ПК – расход песка кварцевого обогащенного в  $1 \text{ м}^3$  бетона плит (табл. 1),

ЩГ – расход щебня гранитного фр. 4-8 мм в  $1 \text{ м}^3$  бетона плит (табл. 1).

Расчет объема пустот (л) смеси песка и щебня:

$$V_{\text{п}} = (V \cdot \Pi) / 100 \quad (7)$$

На основании сравнения физического заполнения объема пустот песка и щебня  $V_{\text{п}}$  объемом цементного теста  $V_{\text{цт}}$  делается вывод о величине пористости бетона плит для нижнего несущего слоя и верхнего лицевого слоя (белый).

Для установления причины высолообразования на поверхности бетонных плит были изучены кислотно-основные свойства водного раствора по водородному показателю pH. Для его оценки моделировали условия эксплуатации бетона плит. Для этого с помощью лабораторной виброплощадки и пригруза массой 5 кг были заформованы образцы-кубы размером  $7 \times 7 \times 7$  см из мелкозернистого бетона по рецептуре и технологии, приближенной к технологии производства плит заводом-изготовителем. Изготовлены серии образцов бетона нижнего несущего слоя и верхнего лицевого слоя черного, белого и серого цветов. Образцы твердели в течение 14 суток в нормально-влажностных условиях в камере типа КНТ с автоматически поддерживаемой влажностью (не менее 98 %) и температурой внутренней среды ( $22 \pm 2$  °C). По истечении указанного срока образцы погрузили в питьевую воду на половину высоты на трое суток, тем самым создавая условия капиллярного водопоглощения. После выдерживания отбирали воду, в которой они хранились, и определяли её водородный показатель pH. Для его измерения использовали стационарный pH-метр «Hanna pH 213», имеющего диапазон измерения pH от -2,00 до 16,00 в интервале температур 9,9...120,0 °C.

Наиболее простым и показательным способом оценки состояния поверхности бетонных плит является их обработка маркерным 1-% фенолфталеиновым раствором, который обычно применяется для установления карбонизации бетона. Это процесс взаимодействия гидратной извести бетона с углекислым газом, в результате которого происходит образование карбоната кальция со снижением pH жидкой фазы бетона. Как известно, при остаточном содержании гидроксида кальция раствор фенолфталеина из прозрачного окрашивается в малиновый цвет.

Оценка содержания ионов хлора в пробах 10-% водных растворов, подготовленных из порошка бетона плит, основывается на прямом потенциометрическом методе измерения с помощью лабораторного иономера И-160МИ [21].

Перед оценкой содержания ионов хлора были приготовлены градуировочные растворы из исходного водного раствора концентрации  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  хлорида калия (х.ч.), который получали путем растворения навески массой 7,455 г этой соли в  $1 \text{ дм}^3$  бидистиллированной воды. Градуировочные растворы готовили с концентрацией хлорида калия  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>. К растворам добавляли фоновый электролит для регулирования ионной силы (БРОИС), который готовили растворением 101,1 г  $\text{KNO}_3$  в колбе емкостью  $1 \text{ дм}^3$ . По результатам измерений строили градуировочный график, в котором по оси ординат откладывали содержание ионов хлора, а по оси абсцисс – значения потенциалов в милливольтках.

Содержание ионов хлора определяли путем измерения потенциала водных растворов с порошком бетона. Эти порошки готовили путем дробления мелкозернистого бетона лицевого слоя плит (черная, серая, белая) с последующим тонким растиранием пестиком измельченного бетона в полусферической фарфоровой ступке ( $\varnothing 100$  мм). Из порошков готовили 10-% водные растворы, которые отстаивали не менее одного часа, отфильтровывали и проводили измерения с помощью иономера.

### 3. Результаты

Результаты определения цветового различия эталонных и основных образцов представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Результаты цветоразности эталонных и основных бетонных плит белого цвета

№ измер.	Наименование образца	Координаты цветового пространства CIE Lab			Цветоразность, $\Delta E^*_{ab}$
		Светлота, L	Положение цвета в диапазоне от зеленого до красного, a	Положение цвета в диапазоне от синего до желтого, b	
1	эталонный	74,1	0,1	6,1	9,9
	основной	65,2	1,1	10,4	
2	эталонный	74,3	0,4	6,8	10
	основной	65,1	1,2	10,4	
3	эталонный	72,9	0,7	7,1	7,5
	основной	65,5	0	5,7	
4	эталонный	73,3	0,3	7	9,1
	основной	64,9	1,4	10,3	
5	эталонный	74,5	0,2	6,3	9,3
	основной	65,8	0,9	9,6	
6	эталонный	65,7	0	4,3	6,6
	основной	62,1	1,1	9,8	
7	эталонный	74,9	0,2	6,6	10,4
	основной	65,2	1	10	
Среднее значение:					9,0

Таблица 3

Результаты цветоразности эталонных и основных бетонных плит черного цвета

№ измер.	Наименование образца	Координаты цветового пространства CIE Lab			Цветоразность, $\Delta E^*_{ab}$
		Светлота, L	Положение цвета в диапазоне от зеленого до красного, a	Положение цвета в диапазоне от синего до желтого, b	
1	эталонный	74,1	0,1	6,1	9,9
	основной	65,2	1,1	10,4	
2	эталонный	74,3	0,4	6,8	10
	основной	65,1	1,2	10,4	
3	эталонный	72,9	0,7	7,1	7,5
	основной	65,5	0	5,7	
4	эталонный	73,3	0,3	7	9,1
	основной	64,9	1,4	10,3	
5	эталонный	74,5	0,2	6,3	9,3
	основной	65,8	0,9	9,6	
6	эталонный	65,7	0	4,3	6,6
	основной	62,1	1,1	9,8	
7	эталонный	74,9	0,2	6,6	10,4
	основной	65,2	1	10	
Среднее значение:					10,2

На рис. 4 представлены микроснимки поверхности бетона плит с лицевым слоем черного цвета.



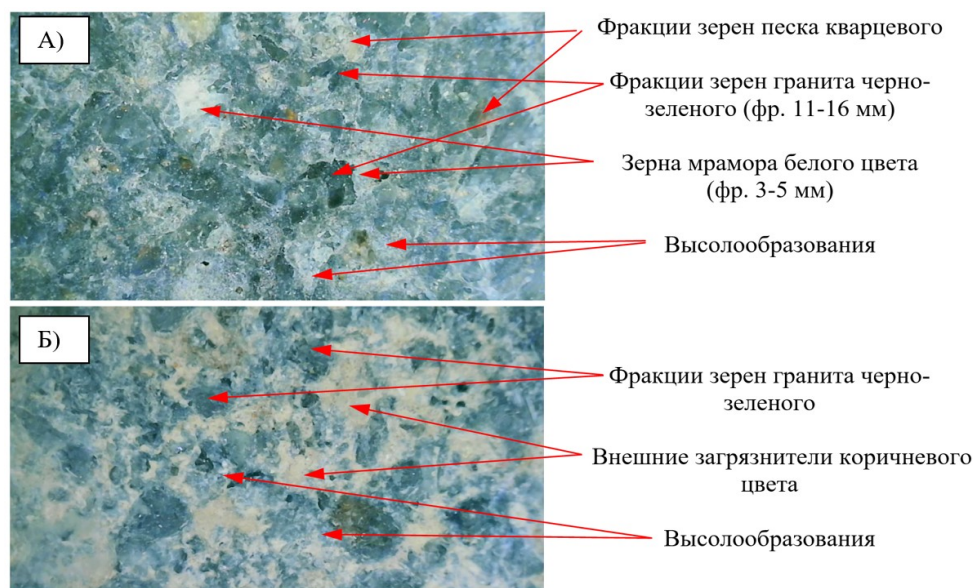


Рис. 4. Микроснимок лицевой поверхности бетона плит «черного» цвета (А – предоставленные заводом-изготовителем, Б – отобранные с объекта) (иллюстрация авторов)  
 Fig. 4. Microphotograph of the front surface of concrete slabs of “black” color (A – provided by the manufacturer, B – selected from the site) (illustration by the authors)

Далее были проанализированы микроснимки плит белого цвета, часть из которых предоставлены заводом-изготовителем, а часть привезены Заказчиком с объекта.

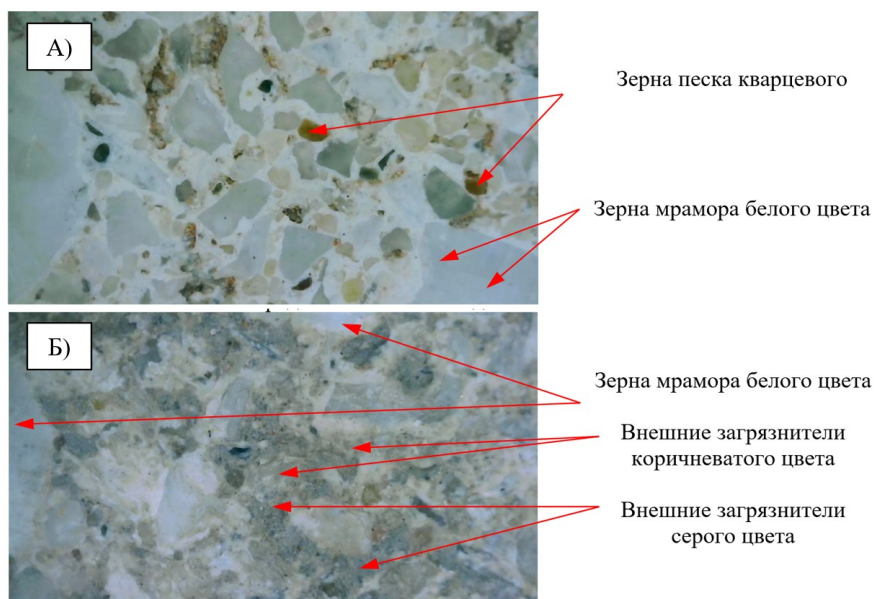


Рис. 5. Микроснимок лицевой поверхности бетона плит «белого» цвета, (А – предоставленные заводом-изготовителем, Б – отобранные с объекта) (иллюстрация авторов)  
 Fig. 5. Micrograph of the front surface of concrete slabs of “white” color, (A – provided by the manufacturer, B – selected from the site) (illustration by the authors)

Результаты измерения водородного показателя pH бетонных образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Кинетика pH воды, отобранной после выдерживания образцов бетона

Время выдержки в питьевой воде	Значение pH воды для				
	-	нижнего слоя	лицевого слоя с цветом		
			черный	белый	серый
3 суток	7,5±0,1	11,1±0,1	10,7±0,1	10,9±0,1	11,0±0,1

Ниже на рис. 6 представлены фотоснимки бетонных плит с маркерным раствором, отобранных на объекте.

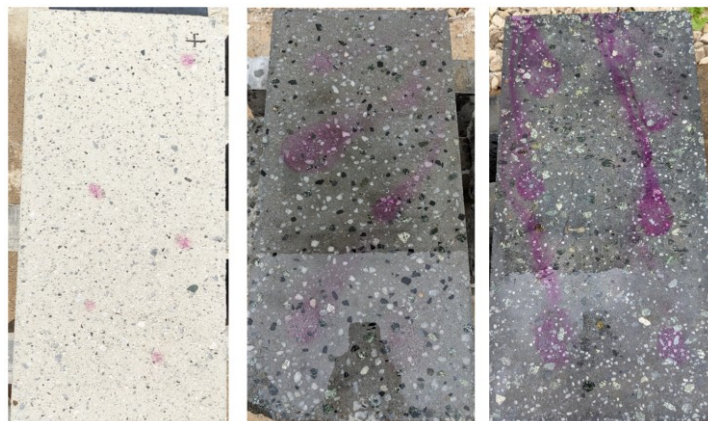


Рис. 6. Фотоснимки поверхностей бетонных плит, обработанных 1-% фенолфталеиновым раствором (слева – «черная» плита, в середине – «белая» плита, справа – «серая» плита) (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Photographs of the surfaces of concrete slabs treated with 1% phenolphthalein solution (on the left is a “black” slab, in the middle is a “white” slab, on the right is a “gray” slab) (illustration by the authors)

Результаты определения среднего содержания ионов хлора из двух проб представлены в табл. 5.

Таблица 5

#### Результаты измерений содержания ионов хлора

Содержание ионов хлора, %					
в калибровочных растворах с концентрацией хлорида калия, моль/дм <sup>3</sup>			в 10-% водных растворах с порошком бетона для лицевого слоя		
10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	белый	серый	черный
0,005	0,05	0,5	0,000012	0,000011	0,000012

#### 4. Обсуждение

Анализ современной нормативной документации по бетонным и железобетонным изделиям показывает, что такой эстетический дефект как выцветы (высолы) фигурирует лишь в одном государственном стандарте и двух региональных документах:

1. ГОСТ 17608-2017 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия»;
2. РМД 32-18-2016 Рекомендации по применению мощения при устройстве покрытий территорий жилой и общественно-деловой застройки, АПВИ, Правительство Санкт-Петербурга, 2016;
3. СТО 58357155-001-2016 «Камни и плиты мощения бетонные вибропрессованные».

Согласно этим документам, выцветы (высолы) на поверхности бетонных изделий не являются дефектом и не влияют на их физико-механические свойства (прочность, морозостойкость, истираемость) [22]. Практика показывает, что эти высолы исчезают самостоятельно под воздействием естественных атмосферных факторов в течение двух лет в результате карбонизации извести и смывания других видов высолов осадками (дождь, снег).

Обращает на себя внимание определение термина «выцветы (высолы)», которое дается в указанных документах. Они поясняют, что основным источником этих эстетических дефектов являются отложения кристаллов растворимых соединений на поверхности бетона, образование которых зависит лишь от его состава. При этом зависимость появления выцветов (высолов) от таких внешних факторов как воздействие

грунтовых вод, антигололедных реагентов, атмосферных осадков, веществ из «монтажных» материалов и др. в указанных документах не упоминается.

Как было показано выше, в действующей нормативной документации образование выцветов (высолов) ставится лишь в зависимость от состава мелкозернистого бетона, используемого для производства изделий, а интенсивность высолообразования определяется пористой структурой этого бетона.

Как видно из табл. 2 и табл. 3, цветоразность  $\Delta E^*ab$  бетонных плит эталонных и основных образцов весьма высокая. Для белых и черных плит, соответственно, она равна 9,0 и 10,2, что существенно превышает допустимое значение 2,3, свыше которого различие внешнего вида образцов наблюдается невооруженным глазом.

Как видно на микроснимке (рис. 3, А), структура поверхности лицевого слоя бетона «черных» плит, предоставленных заводом-изготовителем, представлена зернами гранита черно-зеленого, мрамора белого и песка кварцевого коричневого цвета. Между зернами заполнителей видны тонкие белесые прослойки, что позволяет их отнести к высолообразованиям. Отличительной особенностью структуры поверхности бетонной плиты, отобранных с объекта (рис. 4, Б), является наличие значительной доли образований коричневого цвета. Они не относятся к компонентам бетона и, очевидно, появились в процессе эксплуатации изделий, что позволяет с уверенностью отнести эти образования к внешним загрязнителям (грунт, песок и пр.)

Структура поверхности бетона «белых» плит (рис. 5, А), предоставленных заводом-изготовителем, в основном представлена крупными и мелкими щебневидными зернами белого цвета – мрамором и частично коричневатыми овальными включениями с четко очерченными гранями, которые, очевидно, можно отнести к песку кварцевому. В то же время, плиты, которые эксплуатировались на объекте, заметно потеряли первоначальную яркость и выразительность (рис. 5 Б). В промежутках между белыми зернами мрамора обнаруживаются посторонние вещества сероватого цвета, которые отсутствуют на эталонных образцах. Также видны загрязнители коричневатого цвета, которые распределены в виде тонких прослоек на поверхности бетона. Предположительно, эти два загрязнителя представляют собой монтажный цементно-песчаный раствор, который попал на поверхность плит, например, при их укладке на объекте.

Из расчета сравнения физического заполнения объема пустот песка и щебня  $V_{п}$  объемом цементного теста  $V_{цт}$  следует, что для нижнего несущего слоя объем пустот смеси песка и щебня (314 л) физически не заполняется цементным тестом (238 л) на 76 л. Следовательно, бетон нижнего несущего слоя обладает повышенной структурной пористостью, которая составляет 7,6 % от  $1 \text{ м}^3$  бетона плит. Очевидно, что повышенная пористость является тем негативным фактором, который ускоряет процесс массопереноса влаги через «тело» бетона и закономерно приводит к высолообразованию на поверхности изделий. Бетон же верхнего лицевого слоя обладает относительно низкой структурной пористостью, которая составляет всего 0,7 % от  $1 \text{ м}^3$  бетона плит.

Как следует из данных табл. 4, за относительно короткий период времени показатель рН питьевой воды, в которой выдерживались бетонные образцы, существенно увеличился с 7,5 до ~11. Повышенный уровень рН свидетельствует о высокой концентрации в растворе гидроксид-ионов ( $\text{OH}^-$ ) в сравнении с ионами водорода ( $\text{H}^+$ ) и, соответственно, о том, что водный раствор стал щелочным. Очевидно, что причиной этого является миграция извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которая образуется при гидратации цементного вяжущего, из бетонных образцов с последующим её растворением в воде.

Поскольку при качественной оценке высолообразования маркерным фенолфталеиновым раствором бетонные плиты окрашиваются в яркий малиновый цвет (рис. 6), следовательно, на поверхности содержится значительная доля гидроксида кальция и процесс её карбонизации не завершен. Очевидно, этот процесс является одной из причин появления так называемых выцветов (высолов).

Как следует из результатов определения среднего содержания ионов хлора (табл. 5), пробы порошков бетона содержат незначительную долю ионов хлора, следовательно, повлиять на высолообразование они не могли.

## 5. Заключение

По результатам выполненного исследования следуют следующие выводы:

1. Согласно современной нормативной документации высолы (выцветы), несмотря на ухудшение внешнего вида тротуарных изделий, на их поверхности допускаются (п.4.6.4 ГОСТ 17608-2017). При этом они не влияют на эксплуатационные свойства (прочность, морозостойкость, истираемость) этих изделий. Тем не менее, внешний вид, цвет и рельеф лицевых поверхностей плит должны соответствовать эталонам предприятия-изготовителя;

2. Проанализированы литературные данные и описаны основные факторы, приводящие к высолообразованию: состав и свойства сырьевых материалов, характер и объем пористой структуры бетона, технология прессования изделий и организация складского хранения и воздействие внешних факторов.

3. Выявлено, что заводские эталонные плиты и плиты, отобранные с объекта, имеют повышенную цветоразницу. Микроскопическими исследованиями показано, что они имеют на поверхности внешние загрязнители и белесые отложения.

4. Судя по модельным испытаниям условий эксплуатации плит и качественной оценке маркерным фенолфталеиновым раствором, основной причиной т.н. высолообразования является выщелачивание гидратной извести, которая образуется при гидратации высокоактивного цемента и при действии влаги мигрирует к поверхности этих плит.

5. Расчетно-экспериментальный анализ топологической структуры бетона показывает, что он обладает пористостью, особенно в нижнем слое. Очевидно, что через неё при действии влаги происходит миграция активных веществ с закономерным высолообразованием на поверхности плит. В связи с этим рекомендуется оптимизировать гранулометрический состав заполнителей или использовать в составе бетона тонкодисперсные наполнители, например, кремнеземистые (микрокремнезём, зола-уноса, метакралин и др.), которые будут уплотнять структуру бетона и частично связывать гидратную известь в нерастворимые соединения.

6. Для предотвращения высолообразований на поверхности изделий рекомендуется в технологии их производства предусмотреть узел по нанесению гидрофобизирующих пропиток на кремнийорганической или бутадиен-стирольной основе, которые создают барьер для миграции активных веществ через «тело» бетона.

## Список литературы / References

1. Костиков Ю.Б. Высолы на поверхности бетонных вибропрессованных изделий. Ассоциация производителей вибропрессованных изделий для строительства, мощения и благоустройства (АПВИ). Санкт-Петербург. – 2018. – 18 с.  
[Kostikov Yu.B. Efflorescence on the surface of concrete vibro-pressed products. Association of Manufacturers of Vibropressed Products for Construction, Paving and Landscaping (APVI). Saint Petersburg. – 2018. – 18 p.]
2. Сулейманова Л. А., Малукова М. В. Высолы (выцветы) на поверхности бетонных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 3. – С. 28–31.  
[Suleymanova L. A., Malyukova M. V. Efflorescence (fade) on the surface of concrete products // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2012. – № 3. – P. 28–31.]
3. Efflorescence processes in exterior wall surface of buildings / V. Vinichenko, V. A. Ryazanova, A. I. Gabitov [et al.] // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 968. – P. 115-121. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.115. – EDN UPJOLU.
4. Анощенко, Н. П. Причины возникновения высолов на стенах и методы их устранения / Н. П. Анощенко, Е. А. Анощенко, С. В. Шарина // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК : сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 18 февраля 2021 года. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2021. – С. 485-490. – EDN SJYWBJ.  
[Anoshchenko, N. P. Causes of efflorescence on walls and methods for their elimination / N. P. Anoshchenko, E. A. Anoshchenko, S. V. Sharina // Achievements and prospects for

- scientific and innovative development of the agro-industrial complex: collection of articles based on materials II All-Russian (national) scientific and practical conference with international participation, Kurgan, February 18, 2021. – Kurgan: Kurgan State Academy of Agriculture named after TS Maltsev, 2021. – P. 485-490. – EDN SJYWBJ.]
5. Захаров, А. В. Карбонатно-сульфатные образования в подвале нового здания Института геологии и геохимии УРО РАН / А. В. Захаров, Ю. В. Ерохин, О. Л. Галахова // Минералогия техногенеза. – 2017. – № 18. – С. 82-87. – EDN ZVLKNT.  
[Zakharov, A.V. Carbonate-sulfate formations in the basement of the new building of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences / A.V. Zakharov, Yu.V. Erokhin, O.L. Galakhova // Mineralogy of technogenesis. – 2017. – No. 18. – P. 82-87. – EDN ZVLKNT.]
  6. Метод оптимизации зернового состава дорожного цементобетона / Э. Н. Азаревич, А. С. Лобанова, Д. Р. Гарипова, Д. С. Смирнов // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(11). – С. 21. – EDN VYZSMX.  
[Method for optimizing the grain composition of road cement concrete / E. N. Azarevich, A. S. Lobanova, D. R. Garipova, D. S. Smirnov // Transport technology. – 2019. – № S(11). – P. 21. – EDN VYZSMX.]
  7. Морозова, Н. Н. Мелкозернистые бетоны на песках различной природы / Н. Н. Морозова, Р. Р. Назипов, А. А. Лаврентьева // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов : Сборник материалов XVI Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной 80-летию со дня рождения профессора В.И. Калашникова, Пенза, 20–22 октября 2021 года / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2021. – С. 133-138. – EDN QNIQLW.  
[Morozova, N. N. Fine-grained concrete on sands of various natures / N. N. Morozova, R. R. Nazipov, A. A. Lavrentieva // Theory and practice of increasing the efficiency of building materials: Collection of materials of the XVI International Scientific and Technical Conference young scientists, dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V.I. Kalashnikov, Penza, October 20–22, 2021 / Penza State University of Architecture and Construction. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2021. – P. 133-138. – EDN QNIQLW.]
  8. Гиззатуллин, А. Р. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах / А. Р. Гиззатуллин, Н. Н. Морозова, К. О. Нестерова // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – № 1(11). – С. 47-57. – EDN CBGPNV.  
[Gizatullin, A. R. Functionalized fillers for use in cement concrete / A. R. Gizatullin, N. N. Morozova, K. O. Nesterova // Polymers in construction: scientific Internet journal. – 2023. – № 1(11). – P. 47-57. – EDN CBGPNV.]
  9. Печёнкин, Д. И. Улучшение свойств бетона, используемого в строительстве // E-Scio. 2023. №4 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-svoystv-betona-ispolzuemogo-v-stroitelstve> (дата обращения: 19.09.2023).  
[Pechenkin, D. I. Improving the properties of concrete used in construction // E-Scio. 2023. №. 4 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-svoystv-betona-ispolzuemogo-v-stroitelstve> (date of access: 09/19/2023).]
  10. Засько, В. В. Анализ причин образования высолов на вибропрессованной тротуарной плитке / В. В. Засько // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2019. – № 10(28). – С. 47-51. – EDN ZVDFJA.  
[Zasko, V.V. Analysis of the reasons for the formation of efflorescence on vibropressed paving slabs / V.V. Zasko // Bulletin of the Lugansk Vladimir Dahl State University. – 2019. – №. 10(28). – P. 47-51. – EDN ZVDFJA.]
  11. Hyeok-Jung, K. Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-Activated Slag Cement / K. Hyeok-Jung, S. P. Kang, G. Ch. Choe // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2018. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-9. – DOI 10.1186/s40069-018-0258-3. – EDN HAIUBU.

12. Хозин, В. Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов / В. Г. Хозин, О. В. Хохряков, Р. К. Низамов // Бетон и железобетон. – 2020. – № 1(601). – С. 15-28. – EDN VIDDBF.  
[Khozin, V. G. Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete / V. G. Khozin, O. V. Khokhryakov, R. K. Nizamov // Concrete and reinforced concrete. – 2020. – № 1(601). – pp. 15-28. – EDN VIDDBF.]
13. Бабков В. В., Габитов А. И., Чуйкин А. Е., Мохов А. В. Процессы высолообразования щелочной природы на фасадах зданий из вибропрессованных бетонных блоков // Башкирский химический журнал. 2010. Том 17. № 2. С. 59-62.  
[Babkov V.V., Gabitov A.I., Chuikin A.E., Mokhov A.V. Processes of efflorescence of alkaline nature on the facades of buildings made of vibropressed concrete blocks // Bashkir Chemical Journal. – 2010. – Volume 17. №. 2. – P. 59-62.]
14. Regulation of fine grained concrete efflorescence process / V. V. Strokova, I. V. Zhernovsky, Y. V. Fomenko, N. V. Makarova // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 357-360. – P. 1300-1303. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1300. – EDN RFPRUF.
15. Гридунов, А. В. Применение гидрофобизаторов в строительной сфере / А. В. Гридунов, К. С. Давыдьян, М. А. Тлехусеж // Наукосфера. – 2023. – № 5-2. – С. 250-254. – DOI 10.5281/zenodo.7997014. – EDN KWUOWI.  
[Gridunov, A. V. Application of water repellents in the construction sector / A. V. Gridunov, K. S. Davydyan, M. A. Tlekhusezh // Scienceosphere. – 2023. – No. 5-2. – P. 250-254. – DOI 10.5281/zenodo.7997014. – EDN KWUOWI.]
16. Rudnov, V. S. Effective ways to reduce leaching and formation of efflorescence on structures / V. S. Rudnov, V. A. Belyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 2. Building Materials and Products, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 2. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022025. – DOI 10.1088/1757-899X/687/2/022025. – EDN OBOLIP.
17. Jung-Nan Chang, A study of the mechanical properties and appearance of efflorescence in paving bricks under different curing environments / Jung-Nan Chang, Wei-Chien Wang, Her-Yung Wang, Cong-Yuan Hu // Construction and Building Materials. – 2020. – Volume 265. – 15 p. – ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120148>.
18. Погорелова, Ю. В. Повышение стойкости бетонов к коррозионному воздействию различного рода / Ю. В. Погорелова // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – № 5(27). – С. 15-18. – EDN WCKRAN.  
[Pogorelova, Y. V. Increasing the resistance of concrete to various types of corrosion / Yu. V. Pogorelova // Modern science: current problems and ways to solve them. – 2016. – №. 5(27). – P. 15-18. – EDN WCKRAN.]
19. Лунев, Р. С. Современные способы борьбы с высолами на вибропрессованных изделиях / Р. С. Лунев, Л. Н. Ботцман, Е. В. Лунева // Наукоемкие технологии и инновации : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 06 октября 2017 года – 07 2016 года. Том Часть 3. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 248-251. – EDN YLLWLF.  
[Lunev, R. S. Modern methods of combating efflorescence on vibro-pressed products / R. S. Lunev, L. N. Botsman, E. V. Luneva // Science-intensive technologies and innovations: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference, Belgorod , 06 October 2017 – 07 2016. Part 3. – Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova, 2016. – P. 248-251. – EDN YLLWLF.]
20. Gaurav Sharma. 1.7.2 // Digital Color Imaging Handbook. — CRC Press, 2003. — ISBN 084930900X.
21. Методика определения содержания хлоридов в железобетонных конструкциях мостовых сооружений. – М.: Росавтодор, 2002, 20 с.  
[Methodology for determining the content of chlorides in reinforced concrete bridge structures. – M.: Rosavtodor, 2002, 20 p.]

22. Корнеев В. И. Высолы на бетонных изделиях // Популярное бетоноведение. – 2006. – № 6 (14) // Евроблок: [сайт]. – URL: <http://euroblock.info/servis/vysoly-na-betonnyh-izdeliyah/>?/ (дата обращения: 05.09.2023).  
[Korneev V.I. Efflorescence on concrete products // Popular concrete science. – 2006. – No. 6 (14) // Eurobloc: [website]. – URL: <http://euroblock.info/servis/vysoly-na-betonnyh-izdeliyah/>?/ (reference date: 09/05/2023).]

#### Информация об авторах

**Хохряков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

**Гуляков Евгений Геннадьевич**, аспирант, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: steepsam17@gmail.com

**Хозин Вадим Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

**Беляков Андрей Юрьевич**, аспирант, заведующий лабораторией, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: belyakoffandrrey@mail.ru

#### Information about the authors

**Oleg V. Khokhryakov**, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ninamor@mail.ru

**Evgeny G. Gulyakov**, post-graduate student, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: steepsam17@gmail.com

**Vadim G. Khozin**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

**Andrey Yu. Belyakov**, post-graduate student, head of laboratory, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: belyakoffandrrey@mail.ru