

УДК 666.972.4:620.1:691.322.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70)**А.А. ЗИНОВЬЕВ^{1,2,✉}, Б.И. БУЛГАКОВ¹, О.Б. ЛЯПИДЕВСКАЯ¹**¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация² ООО «Флагман», ул. Советская, д. 47, к. 6, г. Королев, 141069, Российская Федерация

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация

Введение. В статье представлены результаты исследования вибропрессованных бетонных плит, изготовленных с использованием различных технологических добавок. Рассмотрены современные методы оценки их структурных и эксплуатационных характеристик.

Цель. Разработка и апробация методики экспресс-прогнозирования морозостойкости бетонных изделий. Внедрение такого метода позволит существенно сократить время оценки долговечности продукции строительного назначения по сравнению с традиционными длительными циклическими испытаниями.

Материалы и методы. Объектом исследования служили образцы вибропрессованных тротуарных плит, изготовленных в заводских условиях. Номинальные характеристики образцов соответствовали классу бетона по прочности на сжатие В30, марке по морозостойкости F2200 и группе по эксплуатации Б согласно требованиям ГОСТ 17608-2017. Для улучшения свойств бетонной смеси применялись комплексы технологических добавок: пластифицирующих, водоредуцирующих и воздухововлекающих. Были проведены следующие испытания: определение средней плотности разработанных бетонов по ГОСТ 12730.1-2020, их прочности на сжатие по ГОСТ 28570-2012, водопоглощения по массе по ГОСТ 12730.3-2020, морозостойкости в соответствии с Приложением Е к ГОСТ 17608-2017 и ГОСТ 10060-2012, микроструктурный анализ по методике ГОСТ Р 70753-2023.

Результаты. Микроструктурный анализ выявил значительные изменения в структуре затвердевшего бетона, которые напрямую влияют на его морозостойкость. На основании полученных данных выдвинута гипотеза о том, что ключевым фактором долговечности бетонных изделий является наличие и количественное соотношение в них пор двух видов: крупных (диаметром от 1 до 4 мм) и мелких (диаметром до 0,3 мм).

Выводы. Экспериментально подтверждена корреляция

между параметрами поровой структуры, формируемой при вибропрессовании бетонных тротуарных плит, и морозостойкостью бетона; предложен комплексный подход, сочетающий стандартные испытания на морозостойкость и количественный микроструктурный анализ, который является перспективной основой для разработки экспресс-метода прогнозирования долговечности бетонных изделий строительного назначения. Установлено, что для успешной реализации предлагаемой методики необходима разработка детальной программы дальнейших исследований, направленных на определение количественных критериев оценки и на валидацию экспресс-метода для различных составов бетонов.

Ключевые слова: вибропрессование, морозостойкость, микроскопический анализ структуры бетона, плиты бетонные тротуарные, камень бетонный бортовой, экспресс-метод оценки морозостойкости, поровая структура

Для цитирования: Зиновьев А.А., Булгаков Б.И., Ляпидевская О.Б. Прогнозирование морозостойкости бетона с помощью микроструктурного анализа на примере вибропрессованных изделий // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 62–70. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70). EDN: QKJGFL.

Вклад авторов

Зиновьев А.А. – проведение испытаний, разработка методики, формулирование научной гипотезы, написание исходного текста.

Булгаков Б.И. – научное руководство, анализ и обобщение экспериментальных результатов, формулирование выводов.

Ляпидевская О.Б. – литературный обзор, редактирование текста, перевод на английский язык.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.10.2025

Поступила после рецензирования 07.11.2025

Принята к публикации 13.11.2025

A.A. ZINOVIEV^{1,2,✉}, B.I. BULGAKOV¹, O.B. LYAPIDEVSKAYA¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

² Flagman LLC, Sovetskaya str., 47, bld. 6, Korolev, 141069, Russian Federation

PREDICTION OF CONCRETE FROST RESISTANCE USING MICROSTRUCTURAL ANALYSIS USING THE EXAMPLE OF VIBROPRESSED PRODUCTS

Abstract

Introduction. The article presents the results of a study on vibrocompressed concrete slabs produced using various technological additives. Modern methods for evaluating their structural and performance characteristics are reviewed.

The aim of the work is the approbation of a method for rapid prediction of the frost resistance of concrete products. The implementation of such a method will significantly reduce the time required for assessing product durability compared to traditional prolonged cyclic tests.

Materials and methods. The objects of the study were samples of vibrocompressed paving slabs manufactured under plant conditions. The nominal characteristics of the samples correspond to concrete strength class B30, frost resistance grade F200, and service group B in accordance with State Standard 17608-2017. Complexes of technological additives were used to modify the properties of the concrete mixture: plasticizing, water-reducing, and air-entraining. The following tests were conducted: determination of frost resistance in accordance with Appendix E of State Standard 17608-2017; Microstructural analysis using the method of State Standard R 70753-2023.

Results. Microstructural analysis revealed significant changes in the structure of the hardened concrete that directly affect its frost resistance. Based on the data obtained, a hypothesis was put forward that the key factor for durability is the presence and quantitative ratio of pores of two fractions: large pores with a diameter from 1 to 4 mm; small pores with a diameter from 0 to 0.3 mm.

Conclusions. The conducted research confirms the relevance and scientific novelty of the topic. The obtained results allow for the following conclusions: a correlation was identified between the parameters of the pore structure formed during vibrocompression and the frost resistance

of the concrete; the proposed comprehensive approach, combining standard frost resistance tests and quantitative microstructural analysis, is a promising basis for developing an express method for predicting durability. For the successful implementation of the methodology, it is necessary to develop a detailed program for further research aimed at establishing quantitative assessment criteria and validating the method for various concrete compositions.

Keywords: vibrocompression, frost resistance, microstructural analysis of concrete structure, concrete paving slabs, concrete curbstones, rapid method for assessing frost resistance, pore structure

For citation: Zinoviev A.A., Bulgakov B.I., Lyapidevskaya O.B. Prediction of concrete frost resistance using microstructural analysis using the example of vibropressed products. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 62–70. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70). EDN: QKJGFL.

Authors contribution statement

Zinoviev A.A. – tests conducting, methodology developing, formulating a scientific hypothesis, source text writing. Bulgakov B.I. – scientific guidance, analysis and generalization of experimental results, conclusions formulation. Lyapidevskaya O.B. – literary review, text editing, English translation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.10.2025

Revised 07.11.2025

Accepted 13.11.2025

Введение

В последние годы большое внимание уделено вопросу развития благоустройства городов и их транспортной инфраструктуры. Преображение облика больших и малых муниципальных образований является одной из стратегий повышения качества и комфорта жизни граждан Российской Федерации. Что касается дорожно-транспортной инфраструктуры населенных пунктов, то подавляющую долю твердых покрытий дорог занимают асфальтобетоны на основе битумных вяжущих. При этом в зоне примыкания тротуаров к проезжей части располагаются бетонные изделия в виде бортовых камней и тротуарных плит, изготовленные методом полусухого вибропрессования с использованием цементного вяжущего [1–4]. На данный вид бетонных изделий распространяются требования ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 6665-91 [6]. Ввиду жестких условий эксплуатации к изделиям предъявляют высокие требования по морозостойкости. Так, в ГОСТ 6665-91 [6] в качестве требуемой марки по морозостойкости к бетонным изделиям предъявляют требование от F100 до F300, а в версии ГОСТ 6665-2023 [7], разработанной для применения на территории Евразийского экономического союза (ЕАЭС), нормируются марки от F₂100 до F₂300. В ГОСТ 17608-2017 [5] для всех групп по эксплуатации плит бетонных тротуарных назначена марка F₂200. При приемке изделий на объектах чаще всего ограничиваются испытаниями по определению фактического класса бетона по прочности на сжатие и определению показателя водопоглощения. Прямого требования об обязательной проверке морозостойкости изделий при их приемке нет. Проведение данного исследования занимает относительно много времени – не менее 20-ти суток согласно Приложению Е и таблице Е.2 ГОСТ 17608-2017 [5] при марке по морозостойкости F₂200. Трудоемкость и стоимость проверки морозостойкости являются факторами, ограничивающими контроль данного параметра.

На основании полученного производственного опыта были выявлены примеры, когда бетонные изделия, изготавливаемые из одних и тех же материалов и имеющие несущественные отличия по характеристикам водопоглощения, плотности и прочности на сжатие, существенно отличаются результатами их испытаний на морозостойкость [8–11].

Целью является разработка и апробация методики экспресс-прогнозирования морозостойкости бетонных вибропрессованных изделий. Внедрение такого метода позволит существенно сократить время оценки долговечности продукции по сравнению с традиционными длительными циклическими испытаниями. Интерес представляет изучение соотношения качественного и количественного распределений пустотности в затвердевшем вибропрессованном бетоне с последующим сопоставлением показателей качественных характеристик бетона с его морозо-

стойкостью, установлением закономерностей и проверки сформулированной гипотезы на практике.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие материалы и составы:

- цемент ЦЕМ 1 42,5Б (ГОСТ 31108-2020 [12]), цементный завод «ХОЛСИМ», г. Ферзиково);
- щебень гравийный фр. 3–8 мм (карьер Богаево), М800;
- щебень гранитный фр. 5–10 мм («Павловск гранит»), М1400;
- песок кварцевый мытый, М_к 2,67 (карьер Богаево);
- технологические добавки: «Реостаб ВП 01» (водоредуцирующая), «Реостаб ВП 77» (водоредуцирующая, воздухововлекающая), «Реостаб ВП 03» (водоредуцирующая), «Мурасан БВА 19» (водоредуцирующая).

Методика проведения испытания включала изготовление и испытание образцов на прочность на сжатие по ГОСТ 28570-2019 [13], определение средней плотности бетонов по ГОСТ 12730.1-2020 [14] и водопоглощения по массе по ГОСТ 12730.3-2020 [15], определение морозостойкости по методикам Приложения Е к ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 10060-2012 [16] и исследование поровой структуры бетонов методом микроскопического количественного анализа по ГОСТ Р 70753-2023 [17].

Результаты

Были приготовлены составы бетонов, приведенные в табл. 1, и проведены испытания изготовленных из них образцов с целью определения показателей средней плотности, прочности на сжатие и водопоглощения по массе полученных бетонов в возрасте 28 суток (табл. 2).

В результате проведенных испытаний были выявлены несущественные отличия в прочности на сжатие бетонных образцов и более существенные отличия в значениях их средней плотности и водопоглощения по массе. С целью дальнейшего исследования характеристик полученных бетонов проведены испытания образцов на соответствие марке по морозостойкости составов № 1, 3 и 4 третьим ускоренным методом по методикам Приложения Е ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 10060-2012 [16]. Испытания на морозостойкость образцов состава № 2 не проводились по причине идентичности действия технологических добавок «Реостаб ВО 01» и «Мурасан БВА 19» и полученных с их использованием характеристик бетонов составов № 2 и 4. Испытания проводились на бетонных образцах в форме кернов, выбуренных по [5] из тротуарных плит, а также на образцах цельной тротуарной плиты размером 100 × 200 × 80 мм, изображенных на рис. 1.

Таблица 1

Составы бетонов

Table 1

Concrete compositions

Добавка	«Реостаб ВП 77»	«Реостаб ВП 01»	«Реостаб ВП 03»	«Мурасан БВА 19»
№ состава	1	2	3	4
Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси				
Цемент, кг	370	370	370	370
Песок, кг	1072	1072	1072	1072
Щебень гравийный, кг	487	487	487	487
Щебень гранитный, кг	393	393	393	393
Добавка, кг	0,14	1,7	1,7	1,7
Вода	111	111	115	111
В/Ц	0,30	0,30	0,31	0,30

Таблица 2

Характеристики образцов бетонных тротуарных плит при испытаниях

Table 2

Characteristics of concrete paving slabs samples during testing

№ состава бетона	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение по массе, %	Прочность на сжатие, МПа
1	2420	2,9	45
2	2390	3,5	46
3	2440	3,1	47
4	2388	3,5	46

В соответствии с Приложением Е [5] образцы считаются прошедшими испытание на морозостойкость при снижении средней прочности на сжатие шести образцов в сравнении с контрольными образцами не более чем на 5 %. В результате проведенных испытаний было установлено, что образцы составов № 3 и 4 утратили сплошность и имели разрушения, не соответствующие стандарту. В отличие от них, образцы из бетонного состава № 1 имели среднее значение снижения прочности на сжатие (4,5 %) относительно контрольных, а также на них отсутствовали шелушение поверхности и трещины (рис. 2).

После испытаний разработанных бетонов на морозостойкость в соответствии с методикой [17] был проведен микроскопический количественный анализ порового пространства их структуры (табл. 3)

В результате выявлено, что воздухововлекающая добавка «Реостаб ВП 77» оказывает положительное влияние на морозостойкость бетона, создавая в его структуре дополнительное количество замкнутых пор диаметром до 0,2 мм и сокращая количество крупных пустот диаметром от 1 до 3 мм.



Рис. 1. Вид образцов перед испытанием на морозостойкость (Зиновьев А.А.©)
Fig. 1. The appearance of the samples before the frost resistance test (Zinoviev A.A.©)



Рис. 2. Внешний вид образцов после 20 циклов испытаний по третьему ускоренному методу определения морозостойкости (Зиновьев А.А.©)
Fig. 2. The appearance of the samples after 20 test cycles according to the third accelerated method for frost resistance determination (Zinoviev A.A.©)

Таблица 3

Характеристики порового пространства образцов бетонных тротуарных плит

Table 3

Characteristics of the pore space of concrete paving slabs samples

№ состава бетона	Совокупная доля пор диаметром от 0 до 0,3 мм, %	Совокупная доля пустот диаметром от 1 до 3 мм, %
1	1,1	6,0
3	0,7	8,0
4	0,7	8,5

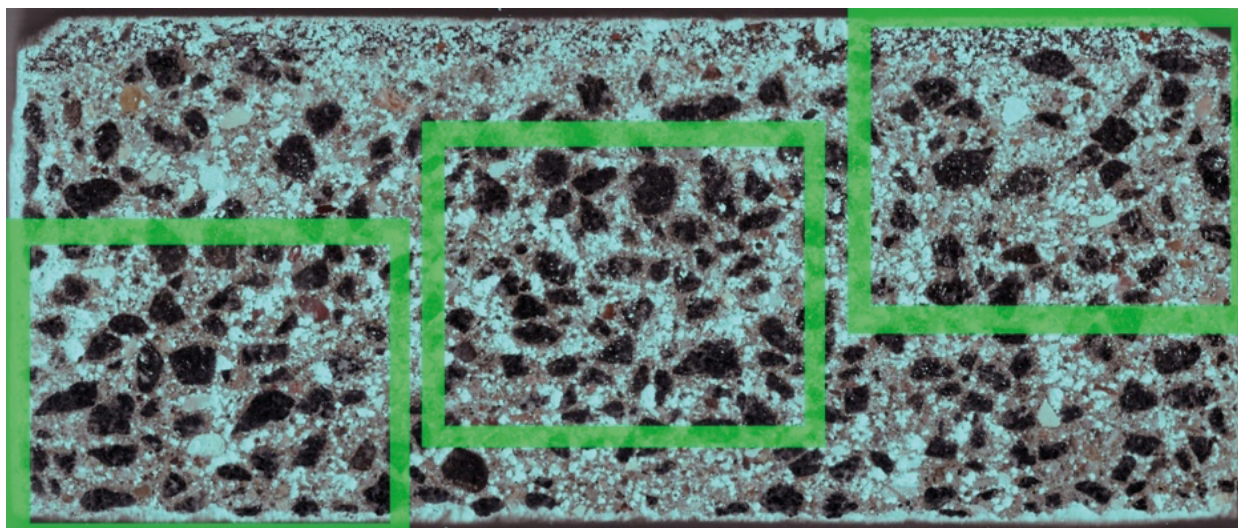


Рис. 3. Микроструктура образца бетона, прошедшего подготовку пробы по ГОСТ Р 70753-2023 [17] (Зиновьев А.А.©)
Fig. 3. The microstructure of the concrete sample, prepared according to State Standard R 70753-2023 [17] (Zinoviev A.A.©)

На основе полученных результатов проведенных экспериментальных исследований была сформулирована научная гипотеза, согласно которой для формирования морозостойкой структуры бетонных изделий, формируемых методом полусухого вибропрессования, определяющим фактором обеспечения требуемой морозостойкости является нормируемое содержание пор и пустот в структуре бетона. При производстве бетонов с низкими В/Ц, менее 0,35, характерным для вибропрессованных изделий, наличие и увеличение доли пор размером до 0,3 мм, описанное ранее Т. Пауэрсом [18–21], позитивно сказывается на их моро-

зостойкости. Однако для вибропрессованных бетонов характерно, что обеспечение требуемой морозостойкости главным образом зависит от доли и распределения крупных дефектных пор.

Следует учитывать, что [17] является первым документом, регламентирующим проведение подобных исследований в отечественной практике, и пока не накоплен опыт подобных работ с применением данной методики. Проведение испытаний требует тщательно отработанной методики подготовки проб и стандартизированного метода оценки полученных результатов.

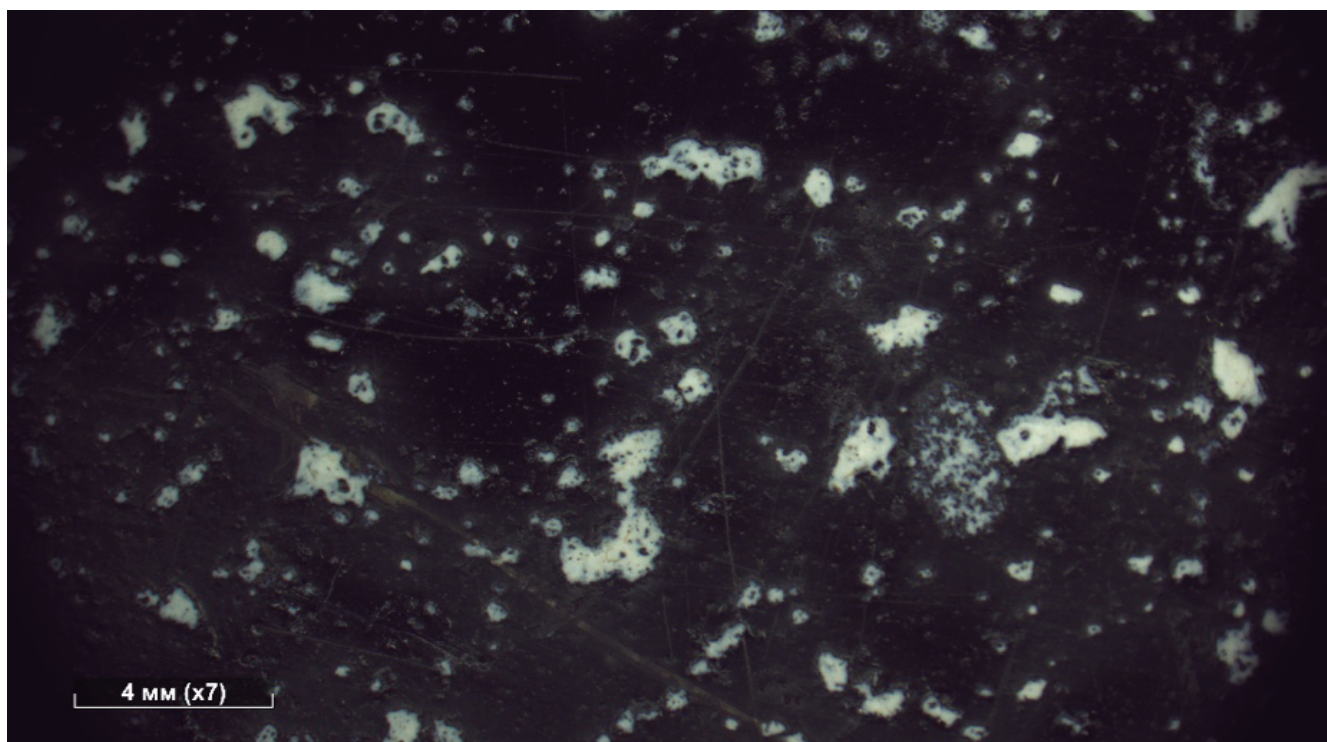


Рис. 4. Микроструктура образца бетона, прошедшего модернизированную подготовку пробы (Зиновьев А.А.©)
Fig. 4. The microstructure of the concrete sample after the upgraded sample preparation (Zinoviev A.A.©)

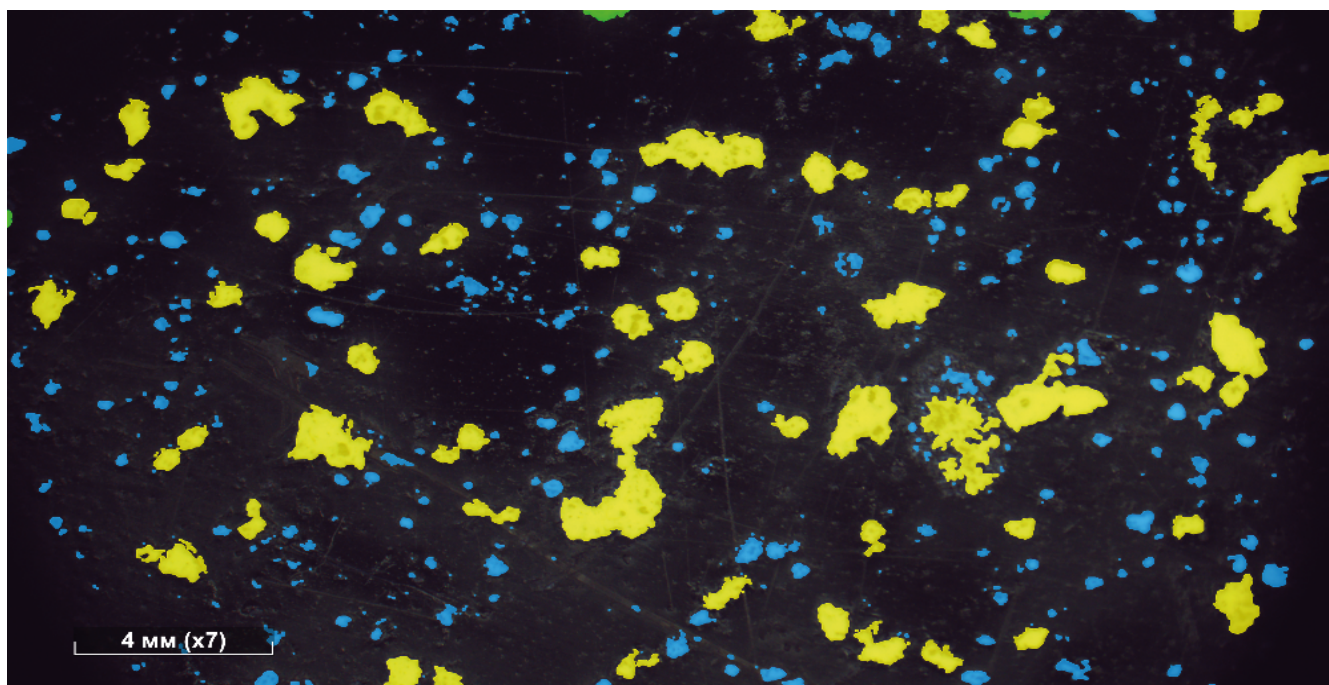


Рис. 5. Определение «полезных» (синих) и «вредных» (желтых) для морозостойкости пустот на образце бетона, прошедшем модернизированную подготовку пробы, методом микроскопического количественного анализа структуры (Зиновьев А.А.©)

Рис. 5. Determination of "useful" (blue) and "harmful" (yellow) for frost resistance voids on a concrete sample after upgraded sample preparation using microscopic quantitative analysis of the structure (Zinoviev A.A.©)

На рис. 3 показано фото бетонного образца, прошедшего подготовку пробы по [17]. Идентификация пор затруднена и требует применения дополнительных флуоресцирующих составов и определенных источников света. Также рис. 4 и 5 – структура образца бетона, прошедшего подготовку пробы по доработанной авторами методике. Методика пробоподготовки дополнена предварительным окрашиванием полированной поверхности образца и последующим заполнением пор контрастным составом. Это позволяет исключить ложноидентифицируемые включения пор и повысить точность обработки результатов. Благодаря наработке практического опыта по предлагаемой методике удастся повысить точность проведения микроструктурного анализа порового пространства бетонов, повысить достоверность результатов для их последующей обработки автоматизированными компьютерными комплексами.

Выводы

Экспериментально подтверждена корреляция между параметрами поровой структуры, формируемой при вибропрессовании бетонных тротуарных плит, и морозостойкостью бетона.

Установлено, что выявляемые предлагаемой улучшенной методикой различия различных экспериментальных серий в поровой структуре бетонов тротуарных плит в процентном соотношении существенно разнятся. Это позволяет точнее, чем метод оценки водопоглощения, прогнозировать морозостойкость плит, поскольку параметры поровой структуры бетона

оказывают существенное влияние на этот их важный эксплуатационный показатель.

Предложенный комплексный подход, сочетающий стандартные испытания на морозостойкость и количественный микроструктурный анализ, является перспективной основой для разработки экспресс-метода прогнозирования долговечности бетонных изделий. Для успешной реализации предлагаемой методики необходима разработка детальной программы дальнейших исследований, направленных на определение количественных критериев оценки и на валидацию экспресс-метода для различных составов бетона.

Следует отметить, что применительно к технологии вибропрессования оценивать качество уплотнения образцов в лабораторных условиях в сравнении с образцами, изготовленными непосредственно в вибропрессовальном станке, не представляется целесообразным, поскольку усилия и режимы вибрации несопоставимо отличаются.

Список литературы

1. Денисова Ю.В., Дегтев И.А. Вибропрессованные камни бетонные стеновые с различными пластифицирующими добавками // *Университетская наука*. 2021. № 2 (12). С. 21–28. EDN: HUYDMH.
2. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н. Оценка качества тротуарной плитки на основе портландцемента, выпускаемой по технологии вибропрессования // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 2 (62). С. 31. EDN: EXNSAM.

3. Tauyshev O.U. Production of pavement slabs using semi-dry vibration pressing technology. *Bulletin of West Kazakhstan Innovative and Technological University*, 2025, vol. 35, no. 3, pp. 622–629. DOI: <https://doi.org/10.62724/202530707>.
4. Бурцев Д.В., Заргарьян Ю.А. Анализ эффективности вибрационного уплотнения бетонной смеси // *Технологии для разработки информационных систем TRIS-2020*. Материалы X Международной научно-технической конференции. 2020. С. 130–133. EDN: GSNQOD.
5. ГОСТ 17608-2017. Плиты бетонные тротуарные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2017.
6. ГОСТ 6665-91. Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1992.
7. ГОСТ 6665-2023. Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. Бишкек: Кыргызстандарт, 2024.
8. Резникова А.Д. Морозостойкость дорожного бетона для покрытий автомобильных дорог. В: *Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития*. Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Уфа, 2024. С. 72–76. EDN: ESBAWN
9. Панченко А.И., Харченко И.Я., Мурашов А.О. Оперативный контроль морозостойкости бетона // *Строительные материалы*. 2024. № 10. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-20-26>. EDN: ULZOWY.
10. Исаченко С.Л., Кодзоев М.Б.Х. Анализ методов повышения морозостойкости бетона // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 4. С. 291–294. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218428>. EDN: XMFQDV.
11. Баркая Т.Р., Бровкин А.В., Цыбина Р.З. Ускоренная оценка морозостойкости бетона. В: *Строительная наука 2013*. Материалы Международной научно-технической конференции. Владимирский государственный университет. 2013. С. 65–70. EDN: VNEIWW.
12. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
13. ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций. Москва: Стандартинформ, 2019.
14. ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Москва: Стандартинформ, 2021.
15. ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. Москва: Стандартинформ, 2021.
16. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2018.
17. ГОСТ Р 70753-2023. Бетоны. Метод микроскопического количественного анализа структуры. Москва: Российский институт стандартизации, 2023.
18. Powers T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing, research and developments laboratories of the portland cement association. *Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, D.C., January 13–16. 1953, vol. 32, pp. 285–297.
19. Powers T. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Proc. ACI*, 1945, vol. 41, pp. 245–272.
20. Powers T. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. *Jorn. of Am. Concr. Inst.*, 1954, vol. 50, pp. 741–760.
21. Powers T. The mechanism of frost action in concrete. *Cement, Lime and Gravel*, 1966, vol. 41, no. 5, pp. 143–148, 181–185.

References

1. Denisova Yu.V., Degtev I.A. Vibropressed concrete wall stones with various plasticizing additives. *University Science*, 2021, no. 2 (12), pp. 21–28. (In Russian). EDN: HUYDMH.
2. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovina I.N. Quality assessment of paving slabs based on Portland cement produced using vibration pressing technology. *Engineering journal of Don*, 2020, no. 2 (62), p. 31. (In Russian). EDN: EXNSAM.
3. Tauyshev O.U. Production of pavement slabs using semi-dry vibration pressing technology. *Bulletin of West Kazakhstan Innovative and Technological University*, 2025, vol. 35, no. 3, pp. 622–629. DOI: <https://doi.org/10.62724/202530707>.
4. Burtsev D.V., Zargaryan Yu.A. Analysis of the effectiveness of vibration compaction of concrete mixtures. *Technologies for the Development of Information Systems TRIS-2020*. Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference. 2020, pp. 130–133. (In Russian). EDN: GSNQOD.
5. State Standard 17608-2017. Concrete paving slabs. Specifications. Moscow: Standartinform Publ, 2017. (In Russian).
6. State Standard 6665-91. Concrete and reinforced concrete curbs. Specifications. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1992. (In Russian).
7. State Standard 6665-2023. Concrete and reinforced concrete curbs. Specifications. Bishkek: Kyrgyz Standard, 2024. (In Russian).
8. Reznikova A.D. Frost resistance of road concrete for road coverings. In: *New science: history of formation, current state, development prospects*. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. Ufa, 2024, pp. 72–76. (In Russian). EDN: ESBAWN.
9. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Murashov A.O. Operational control of concrete frost resistance.

- Building materials*, 2024, no. 10, pp. 20–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-20-26>. EDN: ULZOWY.
10. Isachenko S., Kodzoev M.B. Analysis of methods to increase frost resistance of concrete. *Bulletin of Science and practice*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 291–294. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218428>. EDN: XMF XD V.
 11. Barkaya T.R., Brovkin A.V., Tsybina R.Z. Accelerated assessment of concrete frost resistance. In: *Construction Science 2013*. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Vladimir State University. 2013, pp. 65–70. (In Russian). EDN: VNEI WV.
 12. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
 13. State Standard 28570-2019. Concretes. Methods of strength determination on cores selected from structures. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
 14. State Standard 12730.1-2020. Concretes. Methods of determination of density. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
 15. State Standard 12730.3-2020. Concretes. Method of determination of water absorption. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
 16. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
 17. State Standard R 70753-2023. Concretes. Method of microscopic quantitative analysis of the structure of air pores. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023. (In Russian).
 18. Powers T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing, research and developments laboratories of the portland cement association. *Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, D.C., January 13–16. 1953, vol. 32, pp. 285–297.
 19. Powers T. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Proc. ACI*, 1945, vol. 41, pp. 245–272.
 20. Powers T. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. *Jorn. of Am. Concr. Inst.*, 1954, vol. 50, pp. 741–760.
 21. Powers T. The mechanism of frost action in concrete. *Cement, Lime and Gravel*, 1966, vol. 41, no. 5, pp. 143–148, 181–185.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Зиновьев[✉], аспирант, НИУ МГСУ, Москва; директор, ООО «Флагман», Королев
e-mail: flagman.Him@gmail.com

Alexander A. Zinoviev[✉], Graduate Student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; Director, Flagman LLC, Korolev
e-mail: flagman.Him@gmail.com

Борис Игоревич Булгаков, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: fakultetst@mail.ru

Boris I. Bulgakov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: fakultetst@mail.ru

Ольга Борисовна Ляпидевская, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва

Olga B. Lyapidevskaya, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author