

## З.У. БЕППАЕВ✉, Л.Х. АСТВАЦАТУРОВА, С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ, С.А. ВЕРНИГОРА, В.В. ЛОПАТИНСКИЙ

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,  
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА НА РЕЦИКЛИНГОВОМ (БЕТОННОМ) ЩЕБНЕ

### Аннотация

**Введение.** Одним из важнейших резервов экономии материальных и энергетических ресурсов в области строительной индустрии является повторное вовлечение в сферу производства рециклингового (бетонного) щебня, в частности для производства тяжелых бетонов классов В7,5–В35 общестроительного назначения. Решение этой проблемы практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций) и создать условия для выполнения важных социальных, экономических и экологических задач.

**Цель.** Проведение экспериментальных исследований по определению нормируемых характеристик долговечности бетона и железобетона на основе рециклингового (бетонного) щебня и природного песка, а также их сравнение с аналогичными по составу бетонами на основе природных щебня и песка.

**Материалы и методы.** Для проведения исследований в качестве крупного заполнителя применяли рециклинговый (бетонный) и гранитный (природный) щебень по ГОСТ 8267-93. В качестве мелкого заполнителя применяли природный песок по ГОСТ 8736-2014. В качестве вяжущего применяли портландцемент по ГОСТ 31108-2020. В качестве добавки применяли суперпластификатор С-3 по ГОСТ 24211-2008. Воду затворения применяли по ГОСТ 23732-2011.

**Результаты.** Бетоны на основе рециклингового щебня и природного песка по сравнению с аналогичным по составу бетоном на основе природного щебня и природного песка обладают несколько меньшей прочностью, плотностью и идентичными показателями по водонепроницаемости и морозостойкости.

**Выводы.** По результатам проведенной работы выявлено, что бетон на основе рециклингового щебня и природного песка обеспечивает первоначальное пас-

сивное состояние стальной арматуры и длительно сохраняет (более 100 лет) пассивное состояние стальной арматуры при толщине защитного слоя бетона 10 мм. Бетоны на основе рециклингового щебня и природного песка могут использоваться как традиционные конструкционные бетоны общестроительного назначения.

**Ключевые слова:** рециклинг, рециклинговый щебень, продукты утилизации бетонных и железобетонных конструкций, параметры долговечности бетона и железобетона, эффективный коэффициент диффузии углекислого газа, пассивное состояние арматуры

**Для цитирования:** Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Характеристики долговечности бетона и железобетона на рециклинговом (бетонном) щебне // *Бетон и железобетон*. 2024. № 6 (625). С. 27–39. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-27-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-27-39). EDN: ZMYRQC

### Вклад авторов

Беппаев З.У. – руководство работой, анализ результатов, подготовка статьи.

Аствацатурова Л.Х. – анализ результатов, подготовка и оформление статьи.

Колодяжный С.А. – выполнение экспериментальной части, подготовка статьи.

Вернигора С.А., Лопатинский В.В. – выполнение экспериментальной части.

### Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.12.2024

Поступила после рецензирования 17.12.2024

Принята к публикации 19.12.2024

Z.U. BEPPAEV✉, L.H. ASTVATSATUROVA, S.A. KOLODYAZHNY,  
S.A. VERNIGORA, V.V. LOPATINSKY

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center  
of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

# DURABILITY CHARACTERISTICS OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE WITH RECYCLING (CONCRETE) RUBBLE

## Abstract

*Introduction.* One of the most important reserves for saving material and energy resources in the construction industry is the re-involvement of recycled (concrete) crushed stone in the production sector, in particular for the production of heavy concrete of classes B7,5–B35 for general construction purposes. Solving this problem will practically ensure the implementation of the most important principle of waste-free technological processes (in the production of precast and monolithic concrete and reinforced concrete structures) and create conditions for fulfilling important social, economic and environmental tasks.

*Aim.* Conducting experimental studies to determine the standardized durability characteristics of concrete and reinforced concrete based on recycled (concrete) crushed stone and natural sand, as well as comparing them with similar concretes based on natural crushed stone and sand.

*Materials and methods.* For the research, recycled (concrete) and granite (natural) crushed stone according to State Standard 8267-93 were used as coarse aggregates. Natural sand according to State Standard 8736-2014 was used as a fine aggregate. Portland cement according to State Standard 31108-2020 was used as a binder. Superplasticizer C-3 according to State Standard 24211-2008 was used as an additive. The mixing water was used according to State Standard 23732-2011.

*Results.* Concretes based on recycled crushed stone and natural sand have slightly lower strength, density and identical indicators of water resistance and frost resistance compared to similar concrete based on natural crushed stone and natural sand.

*Conclusions.* Based on the results of the work carried out, it was revealed that concrete based on recycled crushed stone and natural sand ensures the initial passive state of steel reinforcement and retains the passive state of steel

reinforcement for a long time (more than 100 years) with a protective layer thickness of 10 mm. Concretes based on recycled crushed stone and natural sand can be used as traditional structural concretes for general construction purposes.

**Keywords:** recycling, recycled crushed stone, recycling products of concrete and reinforced concrete structures, durability parameters of concrete and reinforced concrete, effective carbon dioxide diffusion coefficient, passive condition of reinforcement

**For citation:** Beppaev Z.U., Astvatsaturova L.H., Kolodyazhny S.A., Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. Durability characteristics of concrete and reinforced concrete with recycling (concrete) rubble. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 6 (625), pp. 27–39. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-27-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-27-39). EDN: ZMYRQC

## Authors contribution statement

Beppaev Z.U. – management of the work, analysis of the results, preparation of the article.

Astvatsaturova L.H. – analysis of the results, preparation and design of the article.

Kolodyazhny S.A. – implementation of the experimental part, preparation of the article.

Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. – implementation of the experimental part.

## Funding

No funding support was obtained for the research.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.12.2024

Revised 17.12.2024

Accepted 19.12.2024

### Введение

Одним из важнейших резервов экономии материальных и энергетических ресурсов в области строительной индустрии является повторное вовлечение в сферу производства рециклинговых щебня и песка, в частности для производства тяжелых бетонов классов В7,5–В35 общестроительного назначения. Решение этой проблемы практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве сборных и монолитных бетонных, а также железобетонных конструкций и изделий) и создать условия для выполнения важных социальных, экономических и экологических задач.

В Российской Федерации ежегодный объем строительных отходов, образующихся в результате ремонта, реконструкции и сноса зданий, составляет 15–17 млн т и в ближайшие годы увеличится до 35–45 млн т. В частности, при сносе одного 5-этажного дома образуется около 15 тыс. тонн отходов. Такие строительные отходы, как правило, перевозятся на специальные полигоны и мусорные свалки. За рубежом концепция использования вторичных ресурсов получила широкое распространение к середине 80-х годов прошлого века.

Несмотря на то что в настоящее время в РФ функционируют десятки дробильно-сортировочных установок по переработке бетонного лома и в целом накоплен положительный опыт применения вторичного щебня и песка, проблема прогнозной оценки их свойств и свойств бетонов на их основе при длительной эксплуатации и обоснования направлений их использования в строительстве изучена недостаточно.

В развитых странах мира уделяется значительное внимание проблеме отходов, образующихся при утилизации бетонных и железобетонных конструкций и изделий. Концепция стран Евросоюза, нашедшая отражение в нескольких директивах, принятых в начале 90-х годов прошлого века, заключается в создании системы рециклинга и вторичном использовании материалов. Таким образом предотвращается образование отходов, оптимизируется процесс их конечной обработки. В этих странах осуществляется практика государственного регулирования в вопросах использования отходов, направленная на постоянную разработку и совершенствование технологических процессов по повторному включению отходов в производственный цикл после их первичного использования. Государственное регулирование предусматривает высокую стоимость захоронения отходов на свалках и введение специальных налоговых ставок для производителей, не применяющих в производстве вторичные ресурсы. Во многих странах Европы при приеме отходов на полигоны требуют официальных доказательств того, что их невозможно переработать. Складирование строительных отходов

на свалках стоит довольно дорого, их дешевле перерабатывать, чем вывозить. Европейский союз и национальные политики большинства европейских стран поощряют местные органы власти к сведению до минимума производства отходов строительства и сноса и к поиску путей создания альтернативной замены природным ресурсам. В Великобритании, в частности с целью сохранения природных ресурсов и стимулирования рециклинга, введен налог на применение каждой тонны природного заполнителя (первичного сырья) в размере 1,6 фунтов стерлингов. Большое значение применению рециклинговых заполнителей для производства бетона (waste management) придается и в Германии. Германия является первой страной, которая создала свои национальные рекомендации о рециклинговом бетоне.

В США существует закон о борьбе с твердыми отходами (в том числе из бетона и железобетона), ориентированный на производство из них вторичных материалов, принятый в 1976 г. Кроме этого, использование вторичного сырья поощряется на государственном уровне, запрещено захоронение отходов, произведенных на территории другого штата. В некоторых штатах устанавливается высокая плата за захоронение отходов. Стоимость переработки отходов во вторичное сырье значительно ниже, чем стоимость утилизации отходов, что является важным экономическим стимулом для создания новых технологий, позволяющих наладить безотходное производство. В США постоянно проводятся рыночные исследования, направленные на выявление и устранение технологических и экономических барьеров для использования вторичного сырья в процессе производства. К примеру, в результате подобного исследования были ликвидированы высокие тарифные ставки на транспортировку вторичного сырья.

В Японии уделяется особое внимание вопросам использования вторичного сырья. Высокие темпы развития промышленного производства, в том числе бетонных и железобетонных конструкций и изделий, привели к проблеме чрезвычайно высокого уровня загрязнения окружающей среды на рубеже 60-х годов прошлого века. В 1967 г. был принят «Основной закон об охране окружающей среды», к которому затем был принят ряд поправок. Основной концепцией закона является возложение обязанностей за переработку отходов на предприятия-производители отходов. Государство использует административные, финансовые и законодательные меры для стимулирования производителей к использованию вторичного сырья. Установлены определенные стандарты переработки промышленных отходов. К примеру, затопление отходов законодательно запрещено с целью предотвращения загрязнения водных объектов. В Японии создана определенная система в сфере переработки отходов, финансируемая государством. Основными направлениями рециклинга в Японии являются:

утилизация отходов в качестве сырья для изготовления исходного продукта, использование отходов для получения какой-либо товарной продукции, применение отходов для рециклингового бетона и железобетона. Активное внедрение в Японии системы рециклинга позволило создать новые рабочие места, появившиеся в результате расширения производства, снизить себестоимость производимой продукции, уменьшить расход первичных материальных и энергетических ресурсов.

Для Российской Федерации использование вторичных ресурсов и внедрение системы рециклинга в производственный процесс является относительно новым и перспективным направлением. В настоящее время переработка вторичных ресурсов не выделена в обособленный объект государственного регулирования – Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 года «Об отходах производства и потребления» с изменениями [1], внесенными Федеральным законом от 28 июля 2012 г. № 128-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [2], не рассматривает отходы как вторичные материальные ресурсы. Платежи за размещение отходов значительно ниже затрат, необходимых на совершенствование технологий. Необходимо повышение платежей за загрязнение окружающей среды и стоимости использования природных ресурсов, что позволит переориентировать предприятия на отказ от использования понятия «отходы» и внедрение в производство систем рециклинга.

Следует отметить, что в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 868-р от 10 мая 2016 г. «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» отмечается низкий уровень вовлечения отходов производства и потребления в новое производство (раздел II, часть 8) [3]. Указом Президента Российской Федерации № 176 от 19 апреля 2017 г. утверждена «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [4]. Одним из приоритетных направлений в этом документе является «развитие системы эффективного обращения с отходами производства и потребления, создание индустрии утилизации, в том числе повторного применения таких отходов».

Бетоны на рециклинговых заполнителях представляют собой одну из актуальных тем исследований в области «зеленого (экологического) строительства» по ГОСТ Р 70346-2022 «Зеленые» стандарты. Здания многоквартирные жилые «зеленые». Методика оценки и критерии проектирования, строительства и эксплуатации» [5].

Проблемами утилизации отходов некондиционных бетонных и железобетонных конструкций в свете получения вторичного щебня и отсева для их последующего использования в Российской Федерации начали заниматься в конце 70-х годов XX века.

В НИИЖБ в конце 70-х – в начале 80-х годов XX века были проведены комплексные исследования заполнителей из дробленного тяжелого бетона и бетонов на их основе. По результатам проведенных исследований были разработаны «Рекомендации по приготовлению и применению бетонов на заполнителях из дробленного тяжелого бетона» [6]. Рекомендации были разработаны под общим руководством д-р техн. наук Б.А. Крылова и Л.А. Малининой в 1982 г. В середине 80-х годов XX века в НИИЖБ были проведены комплексные исследования по переработке и использованию отходов предприятий сборного железобетона. По результатам проведенных исследований были разработаны «Рекомендации по переработке и использованию отходов предприятий сборного железобетона» [7]. Рекомендации были разработаны под общим руководством д-р техн. наук Б.А. Крылова и Б.В. Гусева в 1987 г. В ходе проведения этих исследований были выявлены основные свойства заполнителей из дробленного тяжелого бетона и бетонов на их основе.

В [8] представлены результаты исследования физико-механических свойств вторичного щебня из дробленного бетонного лома. Установлено, что во вторичном щебне присутствуют разнородные по составу и свойству зерна минерального заполнителя, их сростки с цементно-песчаным камнем и агрегаты цементно-песчаного камня. Вторичный щебень менее прочен и менее морозостоек, чем первичный, из-за наличия в нем цементно-песчаного камня. В [9] рассматривается вопрос комплексного применения бетонного лома в качестве щебня (вторичного) взамен природного в цементных бетонах класса по прочности при сжатии выше В35, а также в качестве вторичного вяжущего. Установлено, что вторичный щебень из бетонного лома с маркой по дробимости М600 можно использовать для получения бетона класса В40 и морозостойкостью F<sub>200</sub>. По свойствам он не уступает бетону на природном заполнителе с маркой по дробимости М1200. В [10] анализируются перспективы применения бетонных отходов в технологии композиционных материалов. Обосновывается возможность использования вторичного минерального сырья из дробленного бетона в качестве крупного заполнителя для получения композиционных материалов классом до В25. В [11] рассмотрены проблемы образования большого количества отходов строительства, не используемых вторично. Анализ строительных площадок показал, что большая часть отходов – это бой бетона, который обладает разными прочностными и другими характеристиками. Проведен сравнительный анализ нормируемых характеристик вторичного щебня с природным щебнем. Оценена возможность использования вторичного щебня при возведении и реконструкции элементов гидротехнических сооружений.

Общие нормы и требования, регламентирующие использование вторичного строительного сырья (отходов), в том числе рециркулируемых материалов,



заложены в ряде действующих отечественных нормативно-технических и методических документов.

ГОСТ Р 56020-2020 «Бережливое производство. Основные положения и словарь» [12]. Положения этого ГОСТ могут использоваться при организации предприятий по утилизации бетонных и железобетонных конструкций и изделий с выпуском вторичного строительного сырья в качестве кондиционного материала.

ГОСТ Р 54098-2010 «Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Термины и определения» [13] устанавливает основные термины и их определения в области обращения с отходами как с постоянно пополняемыми (условно возобновляемыми) вторичными материальными ресурсами, при использовании которых в виде сырья хозяйствующий субъект (юридическое лицо или индивидуальный предприниматель) добывается ресурсо- и энергосбережения в процессах хозяйственной деятельности с одновременным снижением техногенной нагрузки на окружающую среду. Стандарт распространяется на вторичные материальные ресурсы, образующиеся из отходов производства и потребления в процессах хозяйственной деятельности.

В ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» [14] указана возможность повторного использования рециркулируемых материалов в производстве бетонов, введено понятие нового вида бетона – рециклированного. Это бетон, изготовленный с применением утилизированных вяжущих, заполнителей и воды.

ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия» [15] регламентирует области применения щебня, песка и песчано-щебеночных смесей из дробленого бетона, в том числе в качестве заполнителей бетона и строительного раствора различного назначения. Этот стандарт также устанавливает технические характеристики, правила приемки, методы испытаний, требования к транспортированию и хранению названных материалов.

По результатам анализа рассмотренных источников можно констатировать, что рециклинговые заполнители (щебень и песок) представляют собой ценный ресурс для производства бетонных и железобетонных конструкций. Их использование для замены природных заполнителей в бетоне может принести значительные экономические, энергетические и экологические преимущества. Производство и транспортировка природных заполнителей являются причиной выбросов, представляющих 0,0046 млн т углеродного эквивалента за каждую тонну природных заполнителей по сравнению с 0,0024 млн т углеродного эквивалента за тонну рециклинговых заполнителей. С учетом мирового потребления 25 млрд т заполнителей в год для производства бетона замена природных заполнителей на рециклинговые значительно сокращает выбросы в окружающую среду. Это преимуще-

ство будет более значимым с течением времени, поскольку истощение источников природных заполнителей инициирует их разработку с больших глубин и их поставки на большие расстояния, в то время как источники рециклинговых заполнителей обычно расположены поблизости к производителям и потребителям бетона.

Во всех рассмотренных научно-исследовательских работах в основном были изучены вопросы, связанные с прочностью бетонов на рециклинговых заполнителях, при этом вопросы, связанные с долговечностью таких бетонов, практически не изучены. В рассмотренных действующих отечественных нормативно-технических и методических документах указана возможность повторного использования рециркулируемых материалов в производстве бетонов. При этом в действующих нормативных документах практически отсутствуют требования к характеристикам долговечности бетонов на основе рециклингового щебня.

Отсутствие данных о долговечности бетонов не дает возможность прогнозировать сроки службы и эксплуатации в различных средах бетонных, а также железобетонных конструкций и изделий на основе рециклинговых заполнителей. Кроме этого, без изучения параметров долговечности таких бетонов нет возможности определять области их применения в строительной отрасли страны.

**Целью** работы являлось проведение экспериментальных исследований по определению нормируемых характеристик долговечности бетона и железобетона на основе рециклингового (бетонного) щебня и природного песка, а также их сравнение с аналогичными по составу традиционными бетонами на основе природных щебня и песка.

### Материалы и методы

Для проведения исследований в качестве крупного заполнителя применяли рециклинговый (бетонный) щебень, выпускаемый ООО «РЕГРАД», фракцией 5–20 мм (марка по дробимости 600, средняя насыпная плотность 1175 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение 8,75 %), а также гранитный (природный) щебень фракцией 5–20 мм (марка по дробимости 1400, средняя насыпная плотность 1380 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение 2,4 %) производства АО «Каменногорское карьероуправление». Остальные нормируемые характеристики рециклингового (бетонного) щебня были идентичны характеристикам гранитного (природного) щебня и соответствовали ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» [16].

В качестве мелкого заполнителя применяли природный песок производства АО «Богаевский карьер» с модулем крупности 2,32, соответствующий ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [17]. В качестве вяжущего для бетонов на основе гранитного и рециклингового щеб-

ня с природным песком применяли портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н производства ООО «ХайдельбергЦементРус», соответствующий ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [18]. В качестве добавки применяли суперпластификатор С-3, соответствующий ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» [19]. Для приготовления бетонов применяли воду, соответствующую ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» [20].

При проведении экспериментальных исследований были подобраны идентичные по составу бетонные смеси на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком. Далее была определена подвижность бетонных смесей и изготовлены образцы для определения прочности, плотности, параметров пористости, водопоглощения, водонепроницаемости, морозостойкости, диффузионной проницаемости для углекислого газа и значения pH жидкой фазы бетонов на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком.

Прочность бетонов на сжатие на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком определяли испытанием образцов-кубов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 6 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [21].

Плотность, а также истинную плотность бетонов определяли испытанием образцов-кубов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 3 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности» [22].

Параметры пористости (поровой структуры) бетонов (полный объем пор, объем открытых капиллярных пор, объем условно-закрытых капиллярных пор) определяли испытанием образцов-кубов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 3 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости» [23].

Водопоглощение бетонов определяли испытанием образцов-кубов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 3 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения» [24].

Водонепроницаемость бетонов определяли испытанием образцов-цилиндров с диаметром и высотой 150 мм (в количестве 6 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» [25].

Морозостойкость бетонов определяли испытанием образцов-кубов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 18 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» [26].

Диффузионную проницаемость для углекислого газа бетонов определяли испытанием образцов-ку-

бов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм (в количестве 9 штук на каждый состав) в соответствии с ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний» [27] с вычислением значений эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне.

Значения pH жидкой фазы бетонов определяли по методике НИИЖБ, в соответствии с которой из растворной части бетонов отбирали пробы размерами зерен 3–5 мм. Отобранные зерна объединяли в навески массой 4–6 г. Далее подготовленные таким образом навески заливали дистиллированной водой объемом 100 мл. В течение 3-х суток навески периодически взбалтывались, а затем с применением иономера определяли значения pH жидкой фазы бетонов.

Способность бетонов на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком первоначально пассивировать стальную арматуру определяли по полученным значениям pH жидкой фазы бетонов. Способность бетонов на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком длительно изолировать стальную арматуру с сохранением ее первоначального пассивного состояния определяли по полученным значениям диффузионной проницаемости бетонов для углекислого газа.

## Результаты

Подобранные для проведения экспериментальных исследований составы бетонов на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком приведены в табл. 1.

Результаты определения подвижности бетонных смесей показали, что расход воды для бетона на основе рециклингового щебня с природным песком на 13 % больше расхода воды для бетона на основе гранитного щебня с природным песком. Это обусловлено большим водопоглощением рециклингового щебня по сравнению с гранитным щебнем.

Результаты определения и сравнения значений прочности на сжатие, плотности, параметров пористости, водопоглощения, водонепроницаемости, морозостойкости, диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа и значений pH жидкой фазы бетонов на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком приведены в табл. 2. Общие виды использованного оборудования и образцов бетона на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком в процессе определения их основных характеристик приведены на рис. 1–11.

Анализ полученных результатов показал, что:

- прочность бетона в возрасте 28 суток на основе гранитного щебня с природным песком выше прочности бетона на основе рециклингового щебня с природным песком на 20 %;
- плотность бетона на основе гранитного щебня с природным песком выше плотности бетона

Таблица 1  
Table 1

**Составы бетонов на основе гранитного и рециклингового щебня с природным песком**  
**Concrete compositions based on granite and recycled crushed stone with natural sand**

Вид бетона	Расход компонентов бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>					В/Ц	Осадка конуса, см
	цемент	щебень	песок	вода	С-3 % от цем.		
Бетон (контрольный) на основе гранитного щебня с природным песком	360	980	860	175	0,5	0,48	15–16
Бетон на основе рециклингового щебня с природным песком	360	980	860	198	0,5	0,55	13–14

Таблица 2  
Table 2

**Результаты определения и сравнения значений прочности на сжатие, плотности, параметров пористости, водопоглощения, водонепроницаемости, морозостойкости, диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа и значений pH жидкой фазы бетонов на основе гранитного и рециклингового щебня с природным песком**  
**The results of determining and comparing the values of compressive strength, density, porosity, water absorption, water resistance, frost resistance, diffusion permeability of concrete for carbon dioxide and pH values of the liquid phase of concrete based on granite and recycled crushed stone with natural sand**

Тип бетона	Прочность на сжатие, МПа/класс бетона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Параметры пористости	Водопоглощение, % по массе	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости	Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа, D <sup>1</sup> × 10 <sup>-4</sup> см <sup>2</sup> /с	Значение pH жидкой фазы
Бетон (контрольный) на основе гранитного щебня с природным песком	42,1–46,2/В30	2382	Ист. плот. 2849 кг/м <sup>3</sup> . Полный объем пор 163,92 см <sup>3</sup>	4,80	W16	F <sub>1</sub> 300	0,14	12,21
Бетон на основе рециклингового щебня с природным песком	32,9–36,2/В25	2169	Ист. плот. 3015 кг/м <sup>3</sup> . Полный объем пор 280,60 см <sup>3</sup>	7,84	W16	F <sub>1</sub> 300	0,25	12,19

на основе рециклингового щебня с природным песком на 10 %, при этом истинная плотность бетона на основе гранитного щебня с природным песком на 6 % выше истинной плотности бетона на основе рециклингового щебня с природным песком;

– полный объем пор бетона на основе гранитного щебня с природным песком меньше полного объема пор бетона на основе рециклингового щебня с природным песком на 70 %;

– водопоглощение (в % по массе) бетона на основе гранитного щебня с природным песком меньше водопоглощения бетона на основе рециклингового щебня с природным песком на 64 %;

– марка по водонепроницаемости бетона на основе гранитного щебня с природным песком идентична

марке по водонепроницаемости бетона на основе рециклингового щебня с природным песком;

– марка по морозостойкости бетона на основе гранитного щебня с природным песком идентична марке по морозостойкости бетона на основе рециклингового щебня с природным песком;

– диффузионная проницаемость для углекислого газа бетона на основе гранитного щебня с природным песком ниже диффузионной проницаемости для углекислого газа бетона на основе рециклингового щебня с природным песком на 75 %;

– значения pH жидкой фазы бетона на основе гранитного щебня с природным песком (pH = 12,21) и бетона на основе рециклингового щебня с природным песком (pH = 12,19) практически идентичны.



**а (a)**



**б (b)**

**Рис. 1.** Общий вид образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм для определения основных характеристик бетона (контрольного) на основе гранитного щебня с природным песком (а) и на основе рециклингового щебня с природным песком (б)  
**Fig. 1.** General view of 100 × 100 × 100 mm cube samples for determining of main characteristics of concrete (control) based on granite crushed stone with natural sand (a) and on the basis of recycled crushed stone with natural sand (b)



**Рис. 2.** Общий вид гидравлического пресса для определения прочности бетонов  
**Fig. 2.** General view of the hydraulic press for determining the strength of concrete



**Рис. 3.** Общий вид климатической камеры для определения морозостойкости бетонов  
**Fig. 3.** General view of the climate chamber for determining the frost resistance of concrete



**Рис. 4.** Общий вид установки для определения водонепроницаемости бетонов  
**Fig. 4.** General view of the installation for determining the water resistance of concrete



**Рис. 5.** Общий вид газоанализатора диоксида углерода для определения диффузионной проницаемости для углекислого газа бетонов  
**Fig. 5.** General view of a carbon dioxide gas analyzer for determining the diffusion permeability of concrete for carbon dioxide





**Рис. 6.** Общий вид образцов бетона на основе гранитного щебня с природным песком до и в процессе испытаний на водонепроницаемость

**Fig. 6.** General view of concrete samples based on granite rubble with natural sand before and during water resistance tests



**Рис. 7.** Общий вид образцов из бетона на основе рециклингового щебня с природным песком до и в процессе испытаний на водонепроницаемость

**Fig. 7.** General view of concrete samples based on recycled crushed stone with natural sand before and during waterproofness tests



**a (a)**

**б (b)**

**Рис. 8.** Общий вид образцов бетона на основе гранитного (а) и рециклингового (б) щебня с природным песком после испытания на диффузионную проницаемость для углекислого газа

**Fig. 8.** General view of concrete samples based on granite (a) and recycled (b) crushed stone with natural sand after testing for diffusion permeability to carbon dioxide



**Рис. 9.** Определение морозостойкости образцов бетона на основе гранитного щебня с природным песком  
**Fig. 9.** Determination of frost resistance of concrete samples based on granite rubble with natural sand



**Рис. 10.** Определение морозостойкости образцов бетона на основе рециклингового щебня с природным песком  
**Fig. 10.** Determination of frost resistance of concrete samples based on recycled crushed stone with natural sand



**а (a)**

**б (b)**

**Рис. 11.** Общий вид образцов из бетона на основе гранитного щебня с природным песком (а) и образцов бетона на основе рециклингового щебня с природным песком (б) после испытаний на морозостойкость  
**Fig. 11.** General view of concrete samples based on granite crushed stone with natural sand (a) and concrete samples based on recycled crushed stone with natural sand (b) after frost resistance tests



### Выводы

1. Исследованные бетоны на основе рециклингового (бетонного) щебня с природным песком по сравнению с аналогичными по составу (за исключением расхода воды затворения) бетонами на основе гранитного щебня с природным песком обладают меньшей прочностью и плотностью. Бетоны на основе рециклингового (бетонного) щебня имеют большее водопоглощение и объем пор.

2. Исследованные бетоны на основе рециклингового (бетонного) щебня с природным песком имеют идентичные с бетонами на основе гранитного щебня с природным песком показатели по водонепроницаемости и морозостойкости.

3. Исследованные бетоны на основе рециклингового и гранитного щебня с природным песком обеспечивают первоначальное пассивное состояние стальной арматуры. Бетон на основе гранитного щебня с природным песком имеет эффективный коэффициент диффузии углекислого газа  $D' = 0,14 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$  и относится к бетонам пониженной проницаемости для углекислого газа. Бетон на основе рециклингового щебня с природным песком имеет эффективный коэффициент диффузии углекислого газа  $D' = 0,25 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$  и относится к бетонам нормальной проницаемости для углекислого газа. Оба вида бетонов (при отсутствии других агрессивных воздействий) способны длительно сохранять (более 100 лет) первоначальное пассивное состояние стальной арматуры при толщине защитного слоя бетона 10 мм.

4. Результаты проведенных исследований показали, что с применением в качестве заполнителей рециклингового щебня с природным песком можно получать тяжелые бетоны общестроительного назначения, характеристики долговечности которых удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов.

5. Использование рециклингового щебня в качестве крупного заполнителя для изготовления новых бетонных, а также железобетонных конструкций и изделий соответствует стандартам «зеленого (экологического) строительства» по ресурсосбережению, бережливому производству и энергосбережению. Повторное применение рециклингового щебня при производстве бетонных, а также железобетонных конструкций и изделий уменьшает негативное воздействие на окружающую среду за счет безотходности производства и сокращения количества отходов, а также позволит наращивать скорость и объемы строительства новых зданий и сооружений. Применение вторичного (рециклингового) щебня при производстве бетонных, а также железобетонных конструкций и изделий приобретает особую актуальность в связи с осуществлением реновации жилищного фонда в Москве (и в других городах страны), а также необходимостью восстановления населенных пунктов после природных катастроф

и вооруженных конфликтов, в том числе в новых регионах Российской Федерации.

### Список литературы

1. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ.
2. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 28 июля 2012 года № 128-ФЗ.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» от 10 мая 2016 года № 868-р.
4. Указ Президента Российской Федерации «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» от 19 апреля 2017 года № 176.
5. ГОСТ Р 70346-2022. «Зеленые» стандарты. Здания многоквартирные жилые «зеленые». Методика оценки и критерии проектирования, строительства и эксплуатации. АО «ДОМ.РФ», 2022.
6. Рекомендации по приготовлению и применению бетонов на заполнителях из дробленного тяжелого бетона. НИИЖБ Госстроя СССР под общим руководством д.т.н. Б.А. Крылова и Л.А. Малининой. Москва, 1982.
7. Рекомендации по переработке и использованию отходов предприятий сборного железобетона. НИИЖБ Госстроя СССР под общим руководством д.т.н. Б.А. Крылова и Б.В. Гусева. Москва, 1987.
8. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Исследование состава и физико-механических свойств вторичного щебня из дробленного бетона // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 41–45.
9. Красникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65>
10. Сидорова А.С., Анцупова С.Г. Отходы дробления бетонного лома как материал для получения заполнителей для бетона // *Материалы всероссийской научно-практической конференции*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.18101/978-5-9793-1632-1-111-114>
11. Галицкова Ю.М., Михасек А.А. Использование отходов в промышленном и гидротехническом строительстве // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 6. С. 51–54.
12. ГОСТ Р 56020-2020. Бережливое производство. Основные положения и словарь. Москва: Стандартинформ, 2020.
13. ГОСТ Р 54098-2010. Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2011.

14. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2013.
15. ГОСТ 32495-2013. Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
16. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
17. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
18. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
19. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2010.
20. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
21. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.
22. ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Москва: Стандартинформ, 2021.
23. ГОСТ 12730.4-2020. Бетоны. Методы определения параметров пористости. Москва: Стандартинформ, 2021.
24. ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. Москва: Стандартинформ, 2021.
25. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
26. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2014.
27. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2010.
5. State Standard R 70346-2022. "Green" standard. "Green" residential building. Assessment method and criteria for design, construction and maintenance. JSC "DOM.RF", 2022. (In Russian).
6. Recommendations for the preparation and application of concrete on aggregates from crushed heavy concrete. NIIZHB of the Gosstroy of the USSR under the general leadership of Dr. Sci. (Engineering) B.A. Krylov and L.A. Malinina. Moscow, 1982. (In Russian).
7. Recommendations on the processing and use of waste from precast concrete enterprises. NIIZHB of the Gosstroy of the USSR under the general supervision of Dr. Sci. (Engineering) B.A. Krylov and B.V. Gusev. Moscow, 1987. (In Russian).
8. Vaisberg L.A., Kameneva E.E. Investigation of the composition and physico-mechanical properties of secondary crushed stone of crushed concrete. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2014, no. 6, pp. 41–45. (In Russian).
9. Krasinikova N.M., Kyrillova E.V., Khozin V.G. Reuse of concrete waste as input products for cement concretes. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2020, no. 1–2, pp. 56–65. (In Russian).
10. Sidorova A.S., Antsupova S.G. Waste from crushing concrete scrap as a material for obtaining aggregates for concrete. *Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 2021. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18101/978-5-9793-1632-1-111-114>
11. Galitskova Yu.M., Mikhasek A.A. The use of waste in industrial and hydrotechnical construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2015, no. 6, pp. 51–54. (In Russian).
12. State Standard R 56020-2020. Lean production. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
13. State Standard R 54098-2010. Resources saving. Secondary material resources. Terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. (In Russian).
14. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
15. State Standard 32495-2013. Aggregates, fines and its mixtures made from recycled reinforced and non-reinforced concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
16. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
17. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
18. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).

### References

1. Federal Law "On Production and Consumption Wastes" dated 24 June, 1998 No. 89-FZ. (In Russian).
2. Federal Law "On Amendments to the Federal Law on Production and Consumption Wastes" dated 28 July, 2012 No. 128-FZ. (In Russian).
3. Decree of the Government of the Russian Federation "Strategy for the Development of the Building Materials Industry for the Period up to 2020 and beyond until 2030" dated 10 May, 2016 No. 868-r. (In Russian).
4. Decree of the President of the Russian Federation "Strategy of Environmental Safety of the Russian Federation for the period up to 2025" dated 19 April, 2017 No. 176. (In Russian).



19. State Standard 24211-2008. Admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).
20. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
21. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
22. State Standard 12730.1-2020. Concretes. Methods of determination of density. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
23. State Standard 12730.4-2020. Concretes. Methods of determination of porosity parameters. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
24. State Standard 12730.3-2020. Concretes. Method of determination of water absorption. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
25. State Standard 12730.5-2018. Concretes. Methods for determination of water tightness. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
26. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
27. State Standard 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).

**Информация об авторах /  
Information about the authors**

**Замир Узаирович Беппаев**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, заведующий лабораторией обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: beton61@mail.ru

**Zamir U. Bepbaev**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: beton61@mail.ru

**Лидия Хореновна Аствацатурова**, старший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Lydia H. Astvatsaturova**, Senior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Сергей Алексеевич Колодяжный**, научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Sergei A. Kolodyazhny**, Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Сергей Анатольевич Вернигора**, младший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Sergey A. Vernigora**, Junior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Владислав Владимирович Лопатинский**, инженер лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Vladislav V. Lopatinsky**, Engineer of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author