

Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор

Владимир Алексеевич Токарев, Максим Дмитриевич Кабалин,
Михаил Сергеевич Грищенко, Марина Алексеевна Высоцкая

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен обзор современных решений в области рециклинга вторичного сырья для производства мелкоштучных бетонных изделий, применяемых в дорожном строительстве. Рассматриваются актуальные проблемы утилизации отходов, сопутствующих технодеятельности человека, и возможности их повторного использования для снижения экологической нагрузки и экономии ресурсов. Анализируются различные виды вторичного сырья, пригодного для вовлечения в бетонные смеси, такие как отходы строительства и сноса, резина, кирпичная крошка и др.

Материалы и методы. На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых отечественных и зарубежных источников, изучен практический опыт применения различного вторичного сырья для нужд транспортно-дорожного комплекса в качестве заполнителя или добавок для мелкоштучных бетонных изделий.

Результаты. Систематизированы данные о свойствах бетонов с использованием вторичного сырья, исследовано влияние различных типов и количества добавок на прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и другие характеристики мелкоштучных бетонных изделий. Проанализированы существующие стандарты и нормативные документы, регламентирующие применение переработанных материалов в дорожном строительстве.

Выводы. Обзор демонстрирует значительный потенциал использования вторичного сырья в производстве мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Вовлечение вторичного сырья в технологию производства мелкоштучных изделий позволяет снизить себестоимость продукции, уменьшить объемы отходов, направляемых на захоронение, и способствует сохранению первичных природных ресурсов. Необходимы дальнейшее исследование и разработка оптимальных технологических решений для обеспечения высокого качества и надежности изделий с применением вторичных материалов с учетом специфики климатических условий и требований к долговечности дорожных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вторичный заполнитель, бетонный лом, строительный мусор, геоника, бетон, устойчивое развитие, мелкоштучные изделия, бордюр, резиновая крошка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Токарев В.А., Кабалин М.Д., Грищенко М.С., Высоцкая М.А. Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 899–919. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919

Автор, ответственный за переписку: Владимир Алексеевич Токарев, tokareva161@mail.ru.

Recycling of secondary raw materials for the manufacture of small-piece concrete products in road construction. Review

Vladimir A. Tokarev, Maksim D. Kabalin, Mihail S. Grishchenko, Marina A. Vysotskaya
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An overview of modern solutions in the field of recycling of secondary raw materials for the production of small-piece concrete products used in road construction is presented. The current problems of waste disposal associated with human activity and the possibility of their reuse to reduce the environmental burden and save resources are considered. Various types of secondary raw materials suitable for use in concrete mixes, such as construction and demolition waste, rubber, brick chips, etc., are analyzed.

Materials and methods. Based on the analysis, generalization and systematization of information obtained from open domestic and foreign sources, the practical experience of using various secondary raw materials for the needs of the transport and road complex as a filler or additives for small-piece concrete products is considered.

Results. The paper systematizes data on the properties of concretes using recycled materials, examines the effect of various types and amounts of additives on strength, frost resistance, water resistance and other characteristics of small-piece

concrete products. The existing standards and regulatory documents regulating the use of recycled materials in road construction are analyzed.

Conclusions. The review demonstrates the significant potential of using recycled materials in the production of small-piece concrete products for road construction. The involvement of secondary raw materials in the production technology of small-piece products makes it possible to reduce the cost of production, reduce the amount of waste sent to burial and contributes to the conservation of primary natural resources. However, further research and development of optimal technological solutions is needed to ensure high quality and reliability of products using recycled materials, taking into account the specifics of climatic conditions and requirements for durability of road structures.

KEYWORDS: secondary aggregate, concrete scrap, construction debris, geonics, concrete, sustainable development, small-piece products, curb, rubber chips

FOR CITATION: Tokarev V.A., Kabalin M.D., Grishchenko M.S., Vysotskaya M.A. Recycling of secondary raw materials for the manufacture of small-piece concrete products in road construction. Review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):899-919. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919 (rus.).

Corresponding author: Vladimir A. Tokarev, tokareva161@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рост численности населения, быстрые темпы урбанизации и истощение природных ресурсов интенсивно усугубляют экологические проблемы планеты. По разным данным в России за год образуется до 100 млн т отходов промышленного производства. При этом на сегодняшний день более 50 % строительных отходов и отходов демонтажа складывается на свалках. Для наглядности рассматриваемой проблематики на рис. 1 показана площадь свалок в России в сравнении с размерами целых государств.

Материалы, содержащиеся на свалках, в основной своей массе являются инертными и характеризуются отсутствием опасных свойств, поэтому могут быть вовлечены в производство строительной продукции и, в частности, для производства работ в дорожном строительстве. Доля образующихся промышленных отходов представлена на рис. 2.

Строительная отрасль — один из ведущих секторов, обостряющих экологические проблемы планеты. В настоящее время любое строительство сложно представить без бетонных изделий. Бетон — это базовый строительный материал, использующийся практически во всех конструкциях: от автомобильных дорог до зданий, железных дорог и мостов. И, по мнению авторов работы [2], бетон считается вторым наиболее потребляемым веществом на Земле после воды. Однако широкое распространение бетона, например в Европе более 750 млн м³ бетона производится ежегодно, что составляет около 4 т бетона на душу населения, влечет за собой ряд негативных последствий [2]. Рекомендации Международного энергетического агентства (МЭА) включают повышение энергоэффективности и использование альтернативных материалов, топлива или сырья в качестве основных средств снижения воздействия бетонных изделий на окружающую

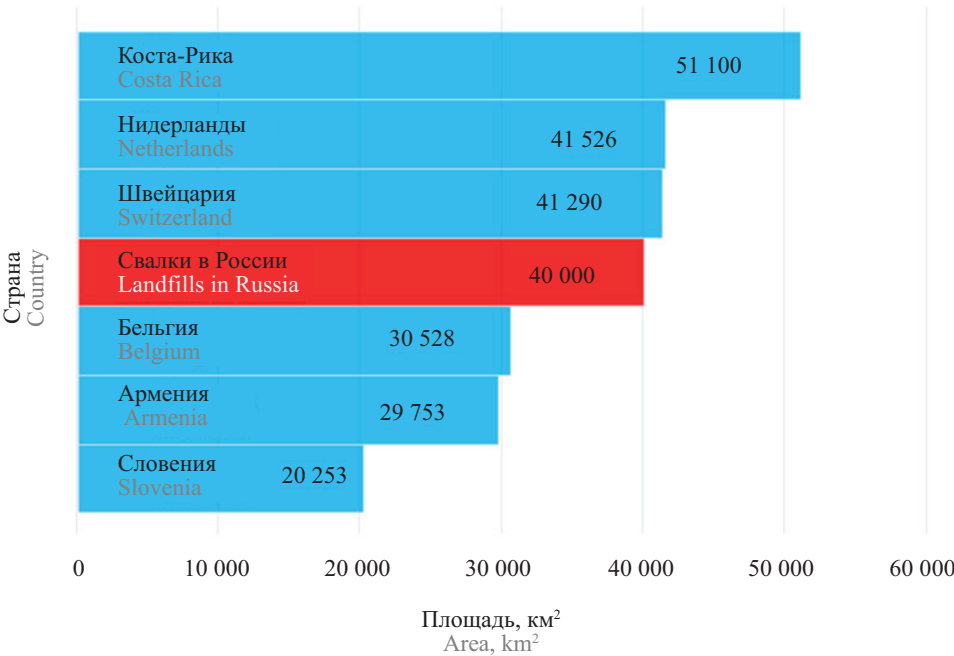


Рис. 1. Площадь свалок в РФ в сравнении с размерами государств

Fig. 1. The area of landfills in the Russian Federation in comparison with the size of states

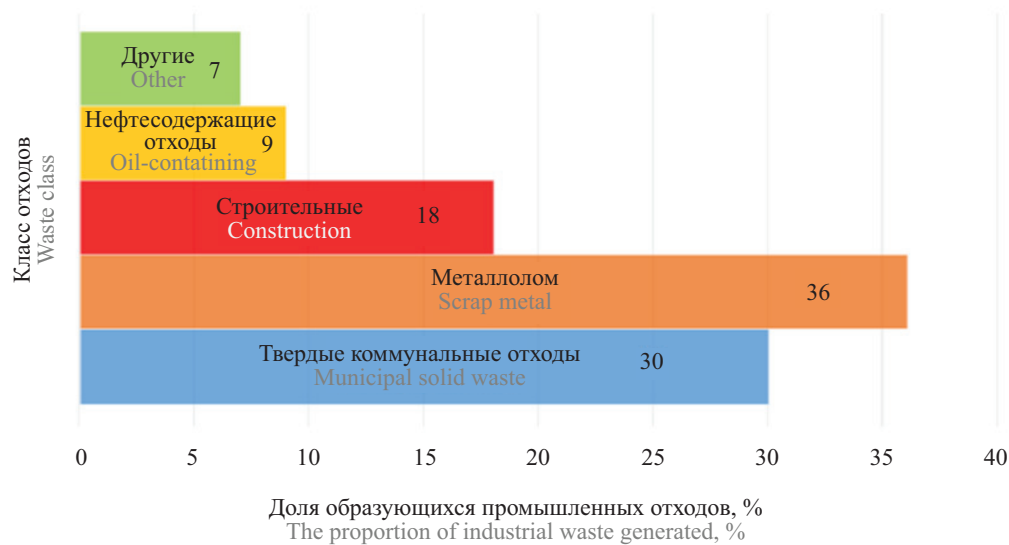


Рис. 2. Отходы промышленности [1]
Fig. 2. Industrial waste [1]

среду. Хотя сам бетон, как готовый материал, не оказывает значимого воздействия на окружающую среду, анализ его жизненного цикла демонстрирует, что производство бетонных компонентов и изделий сопровождается рядом экологических проблем, представленных на рис. 3.

Ежегодное мировое производство цемента составляет порядка 3 млрд т [3], ожидается, что в будущем объем производства будет увеличиваться. При этом производство 1 т клинкера сопровожда-

ется выбросом в окружающую среду до 850 кг CO₂, а также от 1,5 до 9,5 кг оксидов азота и от 0,3 до 1,0 кг твердых частиц с дымовыми газами. Хотя принято считать, что большая часть цементной пыли улавливается фильтрами и вновь направляется в печь [4].

Исследования показывают, что только цементная промышленность ответственна за 7 % мировых выбросов CO₂ [5], являющихся основной причиной глобального потепления. Строительный сектор рас-

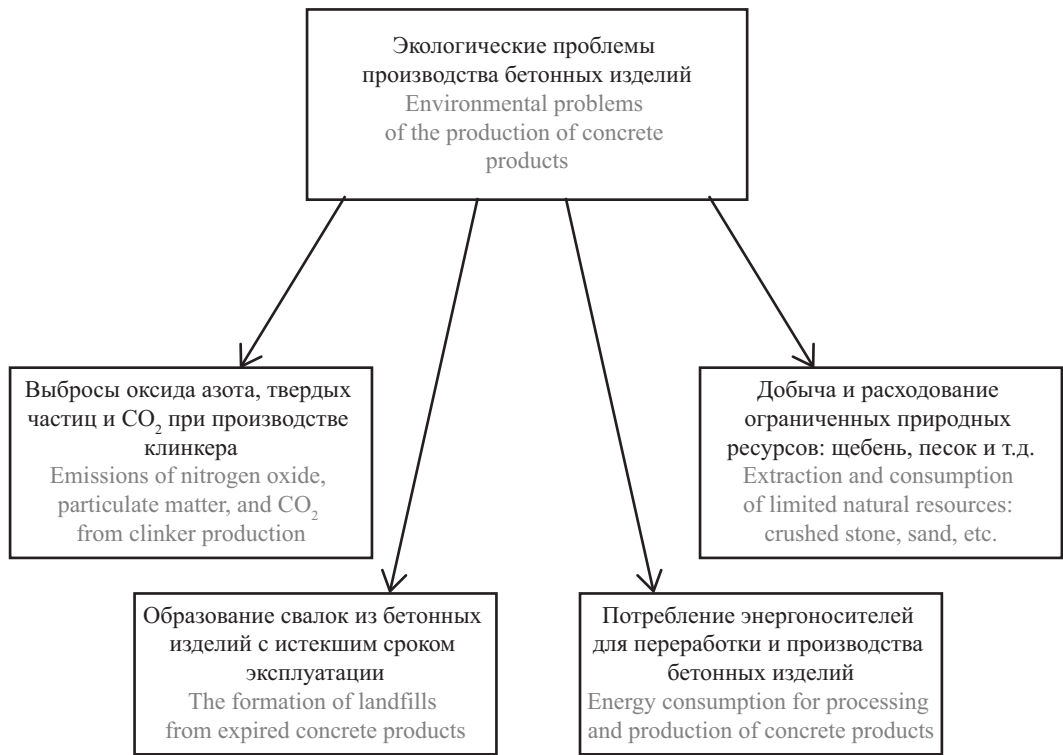


Рис. 3. Экологические проблемы производства бетонных изделий
Fig. 3. Environmental problems of the production of concrete products

полагает самым большим экономически эффективным потенциалом для снижения выбросов парниковых газов [6]. Ввиду значительного потребления бетона даже небольшое сокращение выбросов парниковых газов на тонну его производства может существенно снизить экологическую нагрузку на экосистемы.

Сегодня застройщик имеет широкий выбор в номенклатуре строительных материалов. Однако большинство из них практически ничем не отличаются от вековых аналогов, за исключением высокотехнологичных композитов [7]. Причина этого кроется в стабильном подходе к их производству с акцентом на инженерно-технические требования. Реализация теоретических положений геоники (геомиметики) и системный подход к урегулированию вопросов жизнеустройства помогают создавать комфортную среду для проживания человека. Основу геоники составляет ряд принципов: поиск оптимальных решений; экономия сырья и поиск нового; максимальная экологичность; энергосбережение; гармоничное сочетание конструкций и природы; создание благоприятной среды для жизни человека, гармонично сочетающей производимую им социальную и инженерную инфраструктуру; природное равновесие. Ввиду растущего интереса к устойчивому развитию, различных стимулов и льгот от государства ключевые игроки строительной отрасли как никогда ранее заинтересованы в использовании экологичных материалов с минимальным воздействием на окружающую среду. Следовательно, повышение экологической осведомленности производителей и разработка новых проектов, нацеленных на уменьшение выбросов, могут привести к глобальным позитивным улучшениям в строительной отрасли [8, 9].

Первостепенная экологическая проблема, связанная с бетонной промышленностью, — правильная утилизация строительных материалов [10]. При этом замещение заполнителей играет ключевую роль для экологического развития бетонной отрасли, поскольку они составляют от 80 до 85 % типичной бетонной смеси. Их добыча влечет агрессивное потребление местных природных ресурсов. Песок и гравий — базовые ресурсы, добываемые для производства нерудных материалов и продаваемые в больших объемах, что приводит к эрозии дельт рек, береговой линии и формированию значительных по своей масштабности выработок. Использование заменителей и альтернативных материалов является эффективным средством предотвращения или уменьшения ущерба природным экосистемам [11, 12].

Интенсивность влияния альтернативных материалов определяется масштабами строительной отрасли. Экономика строительства зданий в последние годы демонстрирует восстановление после окончания общемирового локдауна, что сопряже-

но с увеличением производства бетонных изделий в мире. В соответствии с концепцией экономики замкнутого цикла интеграция альтернативных материалов в производство помогает как экономить природные ресурсы, так и сокращать объемы промышленных свалок за счет включения городских и промышленных отходов в бетон. Оценка экологических преимуществ, получаемых от использования переработанных материалов в рядовых строительных элементах, обычно проводится посредством оценки жизненного цикла с точки зрения первичной энергии, затраченной на производство, и выбросов парниковых газов [13]. Включение альтернативного и экологически чистого сырья из вторичного сырья — будущая задача бетонной промышленности [14, 15]. Однако уже сейчас часть мелких и крупных заполнителей в бетоне может быть заменена переработанными материалами, но эта стратегия ограничена техническими проблемами и национальными регулирующими документами [16, 17]. Также использование продуктов рециклинга бетонных изделий сопровождается спецификой воздействия на характеристики производимого товарного бетона [18]. Отличительной особенностью щебня из дробленного бетона служит наличие цементного раствора, налипшего на зерна первоначального щебня [19]. Вопрос количественного содержания этого компонента в различных фракциях щебня из бетонного лома имеет существенное значение для прогнозирования поведения заполнителя в бетонной смеси [20]. Цементный раствор также может быть вторично использован как вяжущее после его активации [21].

Отслужившие свой срок шины — еще один вид отходов, с которым становится все труднее справляться во многих странах. Утилизация отработанных резиновых шин привлекает внимание исследователей, изучающих мировые экологические проблемы. Миллионы шин ежегодно выбрасываются или зарываются, что представляет значительную угрозу для окружающей среды. Было подсчитано, что каждый год почти 1000 млн шин заканчивают свой срок службы, из них более 50 % выбрасываются на мусорные свалки без какой-либо обработки [22]. Прогнозируется, что к 2030 г. будет выброшено 5000 млн шин [23]. Выполненные пилотные разработки [24] демонстрируют, что заполнители, полученные из шин, имеют потенциал для применения в бетоне. Выявлено, что использование шин обладает рядом особенностей, таких как снижение прочности на сжатие и растяжение, при этом пластичность, способность к деформации и прогибу улучшаются. Совокупность указанных свойств может быть полезна и желательна при использовании бетона для изготовления бордюров [25–27]. Данный заполнитель может применяться в количестве до 25 % по объему для бетона в различных областях [28].

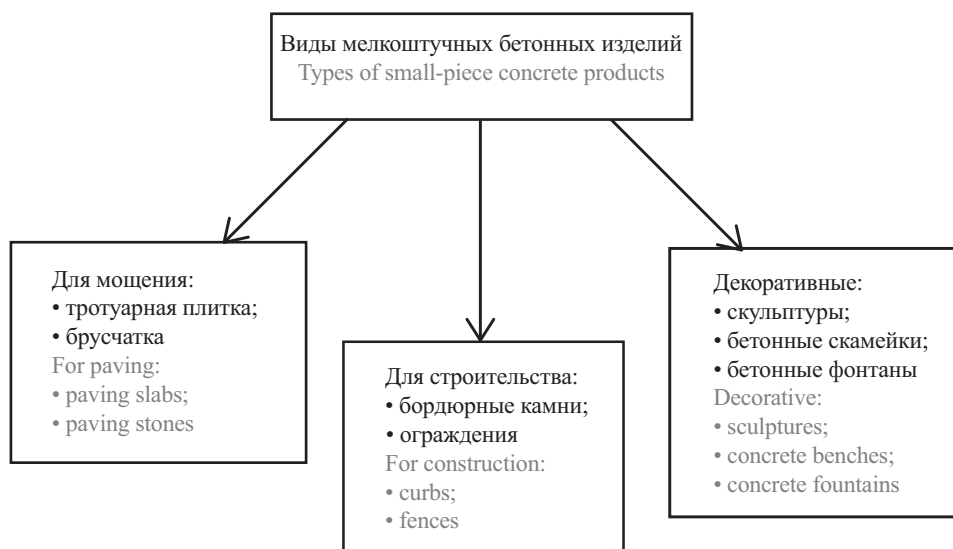


Рис. 4. Виды мелкоштучных бетонных изделий

Fig. 4. Types of small-piece concrete products

Бой кирпича — востребованное техногенное сырье, получаемое в результате демонтажа стен, фундаментов зданий и ограждений, а также из некондиционного кирпича. Благодаря своему минералогическому составу бой кирпича находит широкое применение в строительной индустрии. Молотый кирпичный бой можно рассматривать как аналог природных тонкомолотых минеральных веществ, используемых в качестве пуццолановых добавок в цементных вяжущих [29].

Все описанные выше отходы, которые по сути являются вторичным сырьем, — это часть промышленных свалок. Отходы, содержащиеся на свалках, подразделяются на твердые и жидкие, некоторые из них поддаются переработке, другие нуждаются в обезвреживании и захоронении. Твердые промышленные отходы классифицируются на металлические, неметаллические и комбинированные. Неметаллические бывают химически инертными или химически активными. К первым можно отнести породу, бетон и камень, золу; ко вторым — пластмассы, полиэтилен, резину. Комбинированные представлены разнообразным производственным и строительным мусором, нуждающимся в сортировке.

Таким образом, рассмотрены основные источники вторичного сырья, формирующие строительные свалки. Как видно, ассортимент и объемы вторичного сырья, перспективного с позиции вовлечения в технологию изготовления бетонных изделий, впечатляют. И если в части применения такого бетона для ответственных объектов и изделий есть ряд вопросов, подлежащих проработке, то целесообразность и необходимость вовлечения переработанного вторичного сырья в производство мелкоштучных бетонных изделий для дорожной отрасли однозначна.

Мелкоштучные бетонные изделия — это отдельные элементы из бетона, используемые для строительства, благоустройства, декоративных целей. Виды мелкоштучных бетонных изделий приведены на рис. 4.

Отличительная черта таких изделий — небольшие размеры, что делает их удобными для транспортировки, укладки и монтажа. Перспективность использования переработанных материалов в производстве мелкоштучных бетонных изделий обусловлена тем, что требования к их техническим характеристикам ниже.

В настоящем обзоре анализируются физические, механические и экологические характеристики как мелких, так и крупных заполнителей, применяемых в производстве мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Цель исследования заключается в сборе и обобщении практического опыта применения переработанных материалов и оценке влияния степени замены кондиционного сырья на характеристики конечного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнена аналитическая оценка отечественных и зарубежных научных источников, посвященных теме применения сырья, образующегося в процессе рециклинга, с целью производства мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Изучен иностранный опыт по получению мелкоштучных изделий из бетонного лома. Показаны общие тенденции и различия в подходах для решения данной проблематики. Основными источниками библиометрических исследований выступили такие ресурсы, как отечественная библиотека eLibrary и зарубежные Scopus и Google Scholar. Платформы выбраны как три наиболее рас-

пространенных и обширных онлайн-источника, позволяющих получать сквозные данные и результаты по различным отраслям знаний. Обзор сосредоточен на работах, опубликованных в диапазоне последних 10 лет. Первым этапом исследования стал предварительный отбор статей и рецензий на исходные материалы. Далее были установлены более узкие основные категории поисковых запросов, после чего осуществлен вторичный поиск статей и исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ публикаций продемонстрировал, что значительный интерес к вопросам рециклинга бетонных изделий с целью повторного применения в составе мелкоштучных изделий проявляют зарубежные исследовательские группы. Объем публикаций, затрагивающий эту проблематику в отечественных и зарубежных работах, несопоставим. Публикации российских авторов носят главным образом теоретический характер, но есть и практический опыт. Так, в исследовании [30], выполненном в лаборатории на базе Хакасского технического института — филиала Сибирского федерального университета, был изготовлен бордюрный камень из переработанного бетона. Физико-механические свойства испытуемого вторичного щебня представлены в табл. 1.

На основе данного вторичного щебня, который использовался в качестве крупного заполнителя, полученного из рядового бетона и бетона повышенной прочности (фракции 5–40 мм), изготовлены 4 бетонных образца. В качестве мелкого заполнителя применялся карьерный песок с модулем крупности 2,2, в качестве вяжущего вещества — цемент марки М400 Красноярского цементного завода. Изготовленные образцы бордюрного камня испытаны на сжатие.

Результаты испытаний показали, что прочность на сжатие образцов с заполнителем из бетонного лома различной прочности практически не отличается. Однако образцы с заполнителем из рядового

бетона более прочные на изгиб, чем образцы с заполнителем из более прочного бетонного лома. Результаты могут свидетельствовать, что прочность исходного бетона, из которого получен вторичный щебень, не оказывает существенного влияния на прочность производимого бетона. Исследование также продемонстрировало, что прочность бетона повышается за счет прочного сцепления между цементным камнем и заполнителем. Тонкопористое строение зерен цемента и раствора, присутствующих в заполнителе из бетонного лома, также способствует формированию структуры и увеличению прочности бетона. Образцы, изготовленные из жесткой смеси, показали более высокую прочность, чем образцы из подвижной смеси. Пониженная прочность образцов с заполнителем из бетонного лома может быть связана с наличием остатков цемента и раствора на зернах вторичного щебня, которые становятся более пористыми после механической деструкции при дроблении. Это приводит к повышенному водопоглощению щебня (6–8 %), что, в свою очередь, повышает адгезию вторичного заполнителя с другими компонентами, уплотняет структуру бетона и улучшает сцепление цементного камня с заполнителем [31]. Таким образом, вторичный заполнитель оказывает влияние как на структуру цементного камня, так и на контактную зону между цементным камнем и заполнителем. Далее методом вибролитья также была изготовлена тротуарная плитка.

Данные исследования позволяют сделать вывод о том, что бетонная смесь с щебнем из бетонного лома может быть успешно использована в различных строительных проектах, таких как изготовление бордюрных камней и тротуарных плиток. Применение бетонного лома в качестве заполнителя — рациональное решение, соответствующее принципам устойчивого развития экосистемы. Использование бетонного лома в строительстве — экологически ответственный и экономически эффективный подход.

В бетоне, используемом для получения бортового камня, также было предложено [32] заменить

Табл. 1. Физико-механические свойства вторичного щебня [30]
Table 1. Physical and mechanical properties of secondary crushed stone [30]

Характеристики Characteristic	Результат испытаний Test Result
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	2150–2450
Фактор дробимости, % Fragmentation, %	0,7–0,79
Влажность, % Humidity content, %	3–6
Водопоглощение, % Water absorption, %	4–5
Потери при прокаливании, % Calcination losses, %	5

50 % природного заполнителя на бетонный лом, поставляемый Мадридским заводом по переработке отходов. Цемент, применяемый в исследовании, содержал 25 % тонкомолотых продуктов, полученных при сносе зданий. Керамические побочные продукты, прошедшие активационную термическую обработку, — идеальные компоненты для повторного использования в качестве пуццолановых добавок, без необходимости дополнительных энергозатрат.

Блоки, бордюры и брусчатка широко используются на территории Пиренейского полуострова, в первую очередь, для пешеходных дорожек. При их изготовлении контрольные образцы сравнивались с бетонными блоками, изготовленными из смешанного переработанного заполнителя и «экологически эффективного» цемента, содержащего компоненты, полученные при сносе зданий. Характеристики вторичного заполнителя представлены в табл. 2. Сравнительный анализ с требованиями государственных стандартов Испании^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} демонстрирует отклонение только по показателю водопоглощения.

Далее были изготовлены контрольный образец смеси и изделия с использованием переработанных материалов. После чего выполнены испытания: прочность бетона на сжатие, прочность бордюра на изгиб, прочность брусчатки на растяжение при раскалывании. Полученные данные приведены в табл. 3. Изделия соответствовали размерным требованиям для тротуарных блоков и бордюров, изложенным в соответствующих европейских стан-

дартах^{9, 10}. Ни в одном из изделий не наблюдалось трещин или шелушения поверхности независимо от материала, использованного при их изготовлении. Существенных различий в текстуре между образцами не выявлено. Однако легко обнаруживались различия в цвете, поскольку элементы, изготовленные из переработанных материалов, имели красноватый оттенок, связанный с цветом кирпичной пыли, использованной для производства цемента.

Цемент с добавлением переработанных материалов не смог компенсировать недостатки бетона с использованием вторичного щебня. Его водопоглощение так и осталось повышенным. В свою очередь, пуццолановые свойства и большая удельная поверхность «экологически эффективного» цемента по сравнению с обычным цементом являются положительными факторами, способствующими механической прочности смеси. Представленные результаты [33] подтверждают преимущества кирпичного порошка в качестве частичной замены цемента для регулирования прочности бетона на сжатие. Другие исследователи [34, 35] в свете неблагоприятных эффектов, наблюдаемых при высоких коэффициентах замены первичного заполнителя вторичным, предлагают ограничения в содержании добавки от 15 до 30 %. Утверждается [36], что прочность на сжатие снижается с ростом коэффициентов замены, когда удельная поверхность используемого кирпичного порошка аналогична или ниже, чем у цемента. Механическая прочность на ранней стадии была ниже в бетоне с использованием вторичного заполнителя. Прочность на изгиб ниже, чем у контрольного образца на 26 %, а прочность на растяжение при раскалывании по сравнению с обычными бордюрами и брусчаткой ниже на 12,8 %.

Две наиболее распространенные причины преждевременного разрушения бордюра, как указано в статье [37]: экспансивные почвы и неконтролируемый рост корней деревьев. Во время цикла усадки-набухания экспансивные почвы изменяют объем и оказывают дифференциальное давление на нижнюю часть бордюра [38]. Наличие близлежащих деревьев и местные дренажные условия также влияют на движение грунта [39]. Деревья и кустарники, прилегающие к бордюру, извлекают воду со значительной глубины, пускают корни в осевом и радиальном направлениях и увеличивают потенциал движения бордюра [40]. Диапазон давления, оказываемого корнями деревьев, может составлять от 0,05 до 6 МПа [41, 42], а в исследовании [43] показано, что напряжение, создаваемое в бетонных секциях, может превышать 50 МПа.

⁹ CEN. EN 1338. Concrete paving blocks — Requirements and test methods. CEN : Madrid, Spain, 2003.

¹⁰ CEN. EN 1338/AC. Concrete paving blocks — Requirements and test methods. CEN : Madrid, Spain, 2006.

¹ CEN. EN 197-1. Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. CEN : Belgium, Brussels, 2011.

² CEN. EN 12620+A1. Aggregates for Concrete. CEN : Belgium, Brussels, 2008.

³ CEN. EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates — Part 1: Determination of particle size distribution — Sieving method. CEN : Belgium, Brussels, 2012.

⁴ UNE 146406. Determination of Content, Maximum Size and Thick Aggregate Granulometric Modulus in Fresh Concrete. AENOR : Madrid, Spain, 2018.

⁵ UNE 146121. Aggregates for concrete. Specifications for aggregates for concrete for structural concrete elements. AENOR : Madrid, Spain, 2000.

⁶ CEN. EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 6: Determination of particle density and water absorption. CEN : Belgium, Brussels, 2013.

⁷ CEN. EN 933-3. Tests for geometrical properties of aggregates — Part 3: Determination of particle shape — Flakiness index. CEN : Belgium, Brussels, 2012.

⁸ CEN. EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. CEN : Belgium, Brussels, 2010.

Табл. 2. Характеристики вторичного заполнителя [32]

Table 2. Characteristics of secondary aggregate [32]

Характеристики Characteristic	Результат испытаний Test result	Государственный стандарт Standart
Максимальный размер частиц, мм Maximum particle size, mm	20	–
Минимальный размер частиц, мм Minimum particle size, mm	4	4
Соотношения D20/D4 D20/D4 ratio	5,0	≥1,4
Гранулометрический модуль Granulometric modulus	7,67	–
D4, % Oversize particle content sieve D4, %	5,03	<10
D40, % Oversize particle content sieve D40, %	0	0
D20, % Oversize particle content sieve D20, %	2,21	<10
Содержание мелких фракций, % Fines content, %	0,04	≤1
Насыпная плотность, мг/м³ Apparent density, mg/m³	2,53	–
Водопоглощение, % Water absorption, %	8,53	≤7
Лещадность, % Flakiness index, %	14,75	≤35
Метод Лос-Анджелеса, % Los Angeles coefficient, %	40,99	≤50

Табл. 3. Сравнение прочности контрольного образца и изделий с использованием переработанных материалов [32]

Table 3. Comparison of the strength of the control specimen and products using recycled materials [32]

Свойство Property	Возраст, дни Age	Контрольный образец Control specimen	Бетон с использованием переработанных материалов Concrete using recycled materials
Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	7	24,3 ± 0,2	19,7 ± 1,0
	21	30,4 ± 0,3	26,9 ± 0,6
	28	35,0 ± 0,7	37,1 ± 1,4
Прочность бордюра на изгиб, МПа Kerb flexural strength, MPa	28	5,0 ± 0,12	3,7 ± 0,38
Прочность брусчатки на растяжение при раскалывании, МПа Paving block splitting tensile strength, MPa	28	3,9 ± 0,54	3,4 ± 0,28

С целью определения устойчивости бортового камня к движению почвы и неконтролируемому росту корней деревьев исследователями [44] выбрано пять составов смесей, на основе которых производились бортовые камни. Для того чтобы понять влияние переработанных материалов на свойства бетонных изделий в дополнение к контрольному образцу были использованы составы с добавлением вторичного щебня, переработанных шин и полипропиленового волокна. Состав смесей показан в табл. 4.

По результатам испытаний на прочность при монотонной и циклической нагрузках, а также на трехточечный изгиб, места приложения датчиков представлены на рис. 5, получены данные, указанные в табл. 5 [44].

Очевидно, что плотность бетона с вторичным заполнителем из бетонного лома оказалась ниже, чем у контрольного образца бетонной смеси. Водопоглощение бетона с использованием бетонного лома выше, чем у контрольного образца, что может сократить срок службы бордюра. Полипропилено-

Табл. 4. Состав бетонных смесей [44]

Table 4. The composition of concrete mixtures [44]

Состав смесей Composition of mixtures	Контрольный образец Control specimen	Номер смеси Mix number			
		2	3	4	5
Вода Water	173	173	160	174	166
Цемент Cement	225	225	236,25	262,5	285
Зола Fly ash	75	75	78,75	87,5	95
Природный щебень NA	850	850	–	807,5	–
Вторичный щебень RCA	–	–	784	–	744,6
Переработанные шины TDA	–	–	–	20	20
Мелкий заполнитель FA	900	900	900	900	900
Пластификатор, % Superplasticizer	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Полипропиленовое волокно PPF	0	6	6	6	6

вое волокно незначительно увеличило прочность бордюра на изгиб, что свидетельствует о его незначительном вкладе в максимальную несущую способность. Включение полипропиленового волокна существенно увеличило вязкость разрушения. Бордюры, при изготовлении которых использовалось полипропиленовое волокно, могли выдерживать значительную нагрузку в фазе после пиковой нагрузки, а также показали увеличение устойчивости к смещению и поглотили большое количество энергии трещин на стадии после пика. Это свойство бетона для бордюров может быть ценным при проектировании из-

делия на расширяющейся почве или в месте неконтролируемого роста корней деревьев.

Исследования [45, 46] показывают, что бордюры могут быть изготовлены с заменой до 50 % природного заполнителя на бетонный лом. Это обусловлено тем, что на поверхности вторичного заполнителя сохраняется строительный раствор, который может сделать его более пористым, снизить удельный вес, увеличить водопоглощение и потери при испытаниях на истирание и в целом снизить долговечность [47, 48]. С другой стороны, более грубая и неровная поверхность бетонного лома

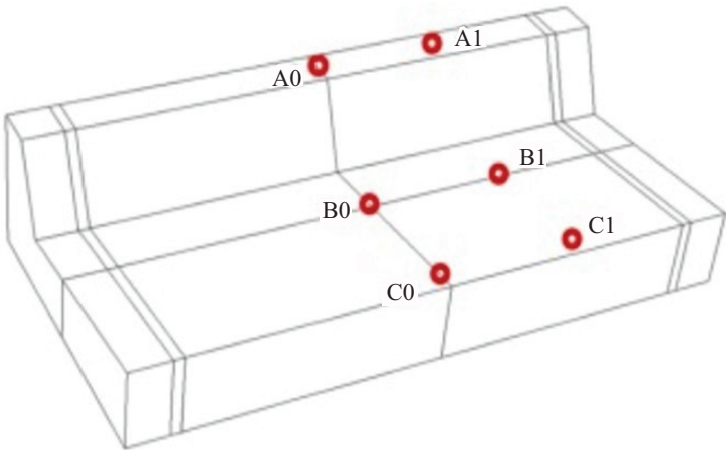


Рис. 5. Места разложения датчиков [44]

Fig. 5. Sensor decomposition sites [44]

Табл. 5. Нагрузочные и деформационные свойства образцов бордюра [44]

Table 5. Load and strain properties of the kerb specimens [44]

Номер смеси Mix number	Пиковая нагрузка, кН Peak load, kN	Остаточная нагрузка, кН Residual load, kN		Максимальная деформация, мкм/м Maximum Strain, μm/m			Прочность, Н/мм Toughness, N/mm
		пиковая peak	минимальная minimum	A	B	C	
1	37,65	–	–	97,43	5117,60	114,13	0,46
2	36,69	18,95	17,81	95,58	76,04	121,68	1,89
3	32,32	19,74	15,87	133,18	95,56	150,06	1,75
4	33,29	17,94	16,84	18 498,00	46,91	211,21	1,82
5	30,21	18,69	15,22	11 039,00	7767,90	147,40	1,82

способствует улучшению адгезии с цементом [49]. Авторами исследования [50] были изготовлены бетонные смеси с включением в них вторичных заполнителей, впоследствии используемые для производства бордюров. Состав смесей показан в табл. 6.

Результаты испытаний на осадку конуса, плотность, прочность на сжатие, растяжение и изгиб представлены в табл. 7 [50].

Как видно, вовлечение указанного количества полипропиленового волокна в состав бетонной сме-

Табл. 6. Состав бетонных смесей [50]

Table 6. The composition of concrete mixtures [50]

Номер Mix number	Вода Water	Цемент Cement	Зола Fly ash	Природный щебень NA	Вторичный щебень RCA	Переработанные шины TDA	Мелкий заполнитель FA	Пластификатор, % Superplasticizer, %	Полипропиленовое волокно PPF
Природный щебень и переработанные шины NA and TDA									
1.1	173	225	75	850	–	–	900	0,45	–
1.2	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	–
1.3	178	300	100	765	–	39	900	0,45	–
1.4	175	322,5	107,5	722,5	–	59	900	0,45	–
1.5	180	345	115	680	–	79	900	0,45	–
Вторичный щебень и переработанные шины RCA and TDA									
2.1	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	–
2.2	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	–
2.3	178	330	110	–	705,5	39	900	0,45	–
2.4	177	352,5	117,5	–	666,4	59	900	0,45	–
2.5	179	375	125	–	627,2	79	900	0,45	–
Природный щебень и полипропиленовое волокно NA and PPF									
3.1	173	225	75	850	–	–	900	0,45	0
3.2	173	225	75	850	–	–	900	0,45	2
3.3	173	225	75	850	–	–	900	0,45	4
3.4	173	225	75	850	–	–	900	0,45	6
Вторичный щебень и полипропиленовое волокно RCA and PPF									
4.1	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	0
4.2	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	2
4.3	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	4
4.4	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	6

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Номер Mix number	Вода Water	Цемент Cement	Зола Fly ash	Природный щебень NA	Вторичный щебень RCA	Переработанные шины TDA	Мелкий заполнитель FA	Пластификатор, % Superplasticizer, %	Полипропиленовое волокно PPF
Природный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно NA, TDA and PPF									
5.1	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	0
5.2	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	2
5.3	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	4
5.4	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	6
Вторичный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно RCA, TDA and PPF									
6.1	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	0
6.2	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	2
6.3	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	4
6.4	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	6

Табл. 7. Свойства бетонных смесей [50]
Table 7. Properties of concrete mixtures [50]

Номер Mix number	Осадка конуса, мм Slump, mm	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa			Прочность на растяжение, МПа Split Tensile Strength, MPa	Прочность на изгиб, МПа Flexural Strength, MPa
			7 дней 7 days	28 дней 28 days	90 дней 90 days		
Природный щебень и переработанные шины NA and TDA							
1.1	80	2283,49	18,00	25,93	32,96	2,95	4,83
1.2	95	2265,05	22,48	27,85	36,83	2,94	4,82
1.3	95	2235,28	22,38	25,23	36,79	3,07	5,14
1.4	85	2230,51	22,73	27,68	37,23	2,94	5,60
1.5	80	2205,77	19,76	27,33	31,48	2,89	5,99
Вторичный щебень и переработанные шины RCA and TDA							
2.1	80	2238,39	17,01	26,55	33,30	2,53	4,11
2.2	80	2210,87	23,86	28,15	34,13	2,52	4,35
2.3	90	2209,53	21,62	28,51	35,86	2,94	4,61
2.4	85	2202,39	21,82	27,72	32,82	2,74	4,78
2.5	80	2167,61	19,91	28,12	31,11	2,66	4,65
Природный щебень и полипропиленовое волокно NA and PPF							
3.1	80	2283,49	18,00	25,93	32,96	2,95	4,83
3.2	75	2268,46	18,38	26,80	33,06	2,57	4,19
3.3	70	2267,72	19,32	26,89	35,22	2,55	4,37
3.4	65	2265,91	19,39	27,13	35,23	2,48	5,13
Вторичный щебень и полипропиленовое волокно RCA and PPF							
4.1	80	2238,39	17,01	26,55	33,30	2,53	4,11
4.2	77	2228,03	19,51	26,55	33,61	2,52	3,91
4.3	73	2219,67	19,55	26,56	35,02	2,48	4,03
4.4	65	2220,84	19,58	27,92	35,23	2,45	3,68

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Номер Mix number	Осадка конуса, мм Slump, mm	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa			Прочность на растяжение, МПа Split Tensile Strength, MPa	Прочность на изгиб, МПа Flexural Strength, MPa
			7 дней 7 days	28 дней 28 days	90 дней 90 days		
Природный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно NA, TDA and PPF							
5.1	95	2265,05	22,48	27,85	36,83	2,94	4,82
5.2	90	2254,00	22,50	28,18	36,91	2,91	3,84
5.3	85	2250,13	22,51	28,38	36,93	2,74	4,83
5.4	80	2242,28	22,67	29,55	36,98	2,55	4,80
Вторичный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно RCA, TDA and PPF							
6.1	80	2210,87	23,86	28,15	34,13	2,52	4,35
6.2	78	2208,01	23,89	29,26	34,27	2,51	3,90
6.3	74	2206,06	23,95	30,02	34,58	2,47	4,19
6.4	65	2203,82	23,97	30,54	35,13	2,44	4,59

си не оказало существенного влияния на прочность при сжатии ни в одной из серий бетонных смесей. Несмотря на то, что при более высоком содержании волокон в ряде серий смесей можно было наблюдать небольшое увеличение прочности при сжатии, четкая тенденция отсутствует. Также следует отметить, что все образцы соответствуют необходимой прочности для данной марки бетона. Незначительное снижение прочности на растяжение при добавлении в бетон полипропиленового волокна может быть связано со слипанием волокон или неправильной ориентацией в плоскости разрушения. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о целесообразности использования данных составов бетона для производства бордюров.

За последние годы проведено множество исследований, в которых переработанные шины предложено применять в качестве заполнителя в бетонных и даже гипсовых композитах [51]. Существуют публикации, в которых отслужившие свой срок шины используются совместно с другими переработан-

ными заполнителями, например бетонными [52, 53] или стеклом [54, 55], а также самостоятельно [56, 57].

Для изучения влияния включения переработанных автомобильных шин в состав бетонной смеси авторами труда [56] использовались различные образцы вторичного материала. Смесь № 1, для которой резина нарезалась до 3 мм, смесь № 2 — резина измельчалась до 0,5 мм и смесь № 3 — резина измельчалась до 0,3 мм. Исходная резина без какой-либо обработки или загрязняющих веществ получалась с завода по переработке автомобильных шин, расположенного в Бирмингеме. Также для смеси № 4 применялся вторичный материал, получаемый посредством смешивания трех фракций вручную. Контрольный образец бетона в анализируемой статье примерно соответствовал отечественному классу бетона по прочности В50. Замена мелкого заполнителя резиной составила порядка 20 %. Состав бетонных смесей приведен в табл. 8.

Прочность образцов бетона на сжатие на 28-й день проверена в соответствии с требованиями на-

Табл. 8. Состав бетонных смесей [56]
Table 8. The composition of concrete mixtures [56]

Состав смесей Composition of mixtures	Контрольный образец Control specimen	Номер смеси Mix number			
		1	2	3	4
Вода Water	234	232	230	230	232
Цемент Cement	632	627	621	621	627
Песок Sand	519	416	410	410	414
Природный щебень NA	1013	1005	996	996	1002
Переработанные шины TDA	—	46	37	37	40

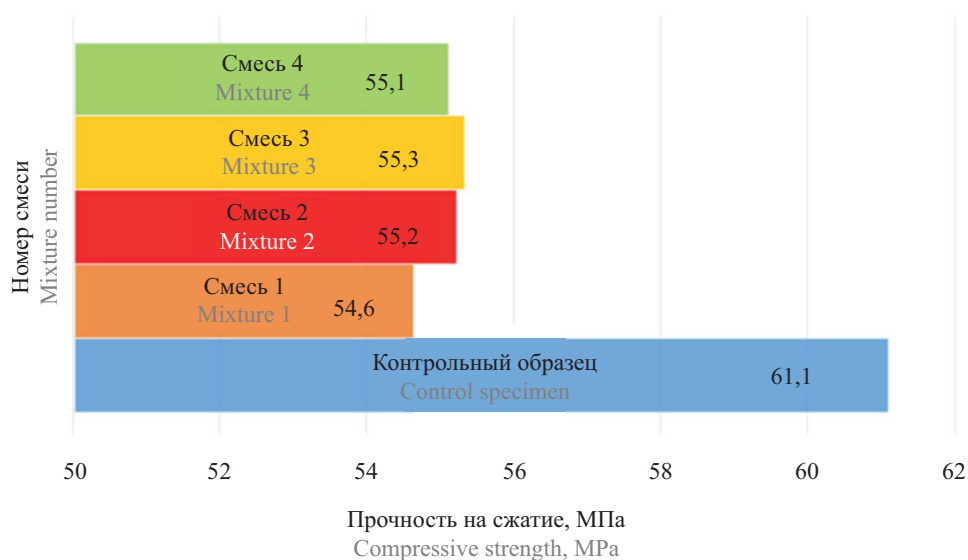


Рис. 6. Динамика изменения прочности на сжатие бетона в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 6. Dynamics of concrete compressive strength changes depending on the rubber aggregate [56]

ционального стандарта¹¹. Полученные данные показаны на рис. 6.

Как видно, замещение натурального мелкого заполнителя вторичным заполнителем, приготовленным из переработанных автомобильных шин, снижает прочность бетона на сжатие. Это было подтверждено результатами испытаний, прочность на сжатие образцов кубов, изготовленных из смесей с использованием резины, снизилась приблизительно на 10 %. Это может быть связано с низкой жесткостью и плохой текстурной поверхностью резиновых частиц, что привело к отсутствию сцепления между резиновыми частицами и окружающим цементным раствором. Однако все бетонные смеси соответствуют необходимой прочности для заданного класса бетона. Прочность бетона на сжатие незначительно увеличилась при уменьшении размера частиц резины. Это объясняется тем, что более мелкие частицы обладают лучшей способностью заполнять пустоты, что приводит к сокращению пустотного пространства и повышению прочности при сжатии. Кроме того, поскольку разрушение бетонных образцов, в первую очередь, происходит из-за расслаивания заполнителей и цементного теста, сцепление играет важную роль в определении прочности бетона. Смесь № 1 характеризуется более гладкой поверхностью, что способствует более слабому сцеплению резинового заполнителя с окружающим цементным раствором.

Испытание на определение подвижности бетонной смеси выполнено в соответствии с требова-

ниями национального стандарта¹². Результаты представлены на рис. 7.

При выполнении эксперимента отмечалось, что все бетонные смеси не подвержены расслоению или растеканию во время смешивания, укладки или уплотнения. Наибольшее значение осадки конуса 95 мм было зарегистрировано для контрольного образца. Смесы с использованием переработанных автомобильных шин характеризуются значениями осадки конуса ниже, чем у контрольного образца. Из этого результата можно сделать вывод, что при замещении резиной части песка наблюдалось общее снижение значений осадки конуса, независимо от размера частиц, вовлекаемого резинового порошка. В основном это объясняется более высоким водопоглощением частиц резины по сравнению с песком, что уменьшает количество свободной воды, тем самым уменьшая удобоукладываемость бетонной смеси. Уменьшение осадки по мере сокращения размера резиновых частиц связано с большей площадью поверхности и водопоглощаемостью частиц более дисперсной резины. Это означает, что во время перемешивания более мелкие частицы резины будут поглощать больше свободной воды, чем более крупные для достижения твердотельного состояния. Другой причиной может быть то, что поверхность мелких частиц резины более грубая. В процессе переработки отработанных автомобильных шин они разрезаются на мелкие кусочки перед отправкой в мельницу. Затем в течение определенного периода времени осуществляется процесс измельчения, прежде чем частицы резины разного раз-

¹¹ BS EN 12390-3:2009. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. British Standards Institution, London, United Kingdom.

¹² BS EN 12350-2:2009. Testing Fresh Concrete — Part 2: Slump-test. British Standards Institution, London, United Kingdom.

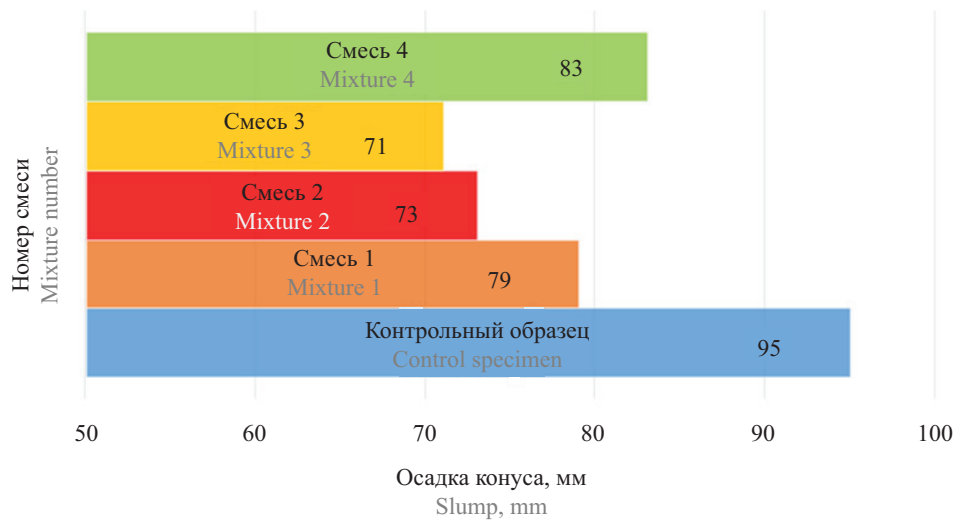


Рис. 7. Динамика изменения осадки конуса в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 7. Dynamics of slump changes depending on the rubber aggregate [56]

мера просеиваются и упаковываются, что приводит к появлению на поверхностях более дисперсных образцов вмятин и неровных участков [58].

Оценка плотности бетонной смеси выполнена в соответствии с требованиями национального стандарта¹³. Результаты представлены на рис. 8.

Таким образом, установлено, что при применении резины в составе бетона, независимо от размера ее частиц, наблюдается снижение плотности бетона. В основном это связано с различиями в плотности резиновых заполнителей. Снижение плотности бетона с использованием резинового заполнителя наибольшей фракции было наименьшим. Это согласуется с исходными значениями плотности резино-

вых заполнителей. Возможным объяснением такой зависимости является неполярная природа частиц резины, которая может приводить к способности отталкивать воду и задерживать воздух на своей поверхности, что впоследствии увеличивает количество воздушных пустот и снижает плотность бетона. При небольшом проценте замещения природного мелкого заполнителя вторичным из резиновых шин серьезного влияния на плотность бетона не оказывается.

Можно сделать вывод, что использование переработанных автомобильных шин в качестве замены мелкого заполнителя в бетоне может найти свое применение в дорожном строительстве для производства бордюров. Рециклинг резиновых шин представляет собой многообещающую стратегию, способствующую решению экологических проблем при незначительном снижении эксплуатационных

¹³ BS EN 12350-6:2009. Testing Fresh Concrete — Part 6: Density. British Standards Institution, London, United Kingdom.

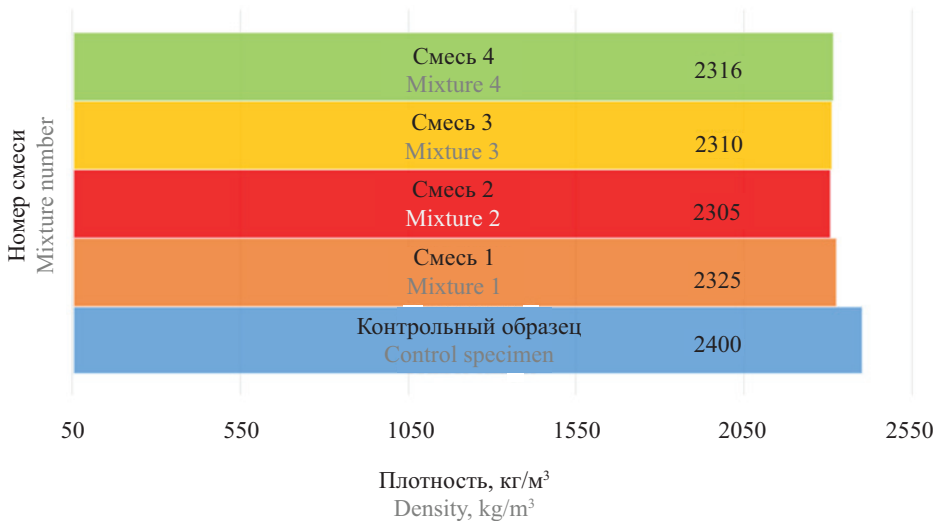


Рис. 8. Динамика изменения плотности бетона в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 8. Dynamics of concrete density changes depending on the rubber aggregate [56]

свойств и удешевлении производства. При условии проведения необходимых исследований и разработки соответствующих стандартов эта практика может стать важным шагом к более устойчивому и эффективному строительству.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный обзор демонстрирует, что использование переработанного бетонного лома в качестве компонента для производства мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве является перспективным направлением. Применение вторичного бетонного сырья позволяет не только снизить потребление первичных природных ресурсов, но и решить проблему утилизации строительного вторичного сырья.

Исследования показали, что бетонные изделия, содержащие переработанный бетонный лом, обладают удовлетворительными физико-механическими характеристиками и могут использоваться в дорожном строительстве. В большинстве исследований вторичный заполнитель удовлетворяет требованиям к качеству, предъявляемым нормативными докумен-

тами, действующими в каждой стране. Потенциал применения переработанного бетона для производства мелкоштучной бетонной продукции велик, однако на данном этапе необходимо решить ряд важных отраслевых вопросов. Дальнейшее развитие этого направления требует проведения дополнительных исследований по оптимизации составов и технологии производства таких бетонных изделий.

Отмечается, что внедрение в технологию производства мелкоштучных бетонных изделий дисперсной молотой резины от автомобильных шин является перспективным, но мало изучаемым отраслевым направлением. В связи с этим особое внимание следует уделить оценке долговечности и эксплуатационных свойств готовой продукции с использованием различного вторичного сырья.

Таким образом, внедрение технологий рециклинга вторичного сырья даст возможность не только сократить объемы отходов, но и повысить экологическую и экономическую эффективность дорожного строительства. Это может снизить общую стоимость содержания, ремонта, реконструкции и строительства в дорожной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Короткова А.С., Скобелкин Ю.А. Проблемы утилизации отходов строительства в России // Юность и знания — гарантия успеха — 2022 : сб. науч. ст. 9-й Междунар. мол. науч. конф. 2022. С. 19–22. EDN GLJKMM.
2. Bjegovic D., Štirmer N., Serdar M. Ecological aspects of concrete production // 2nd International Conference on Sustainable construction materials and technologies. 2010. Pp. 1483–1492.
3. Енуфанов В.А., Васильева Е.В. Развитие производства цемента в условиях современного рынка // Строительство. Экономика и управление. 2016. № 2 (22). С. 2–7. EDN YPJJB.
4. Усов Б.А., Окольников Г.Э., Акимов С.Ю. Экология и производство строительных материалов // Системные технологии. 2015. № 4 (17). С. 84–105. EDN VLANJZ.
5. Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazul-la M.F., Palacios M., Gómez M.P. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30. Issue 9. Pp. 798–805. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003
6. Röck M., Saade M.R.M., Balouktsi M., Rasmussen F.N., Birgisdottir H., Frischknecht R. et al. Embodied GHG emissions of buildings — the hidden challenge for effective climate change mitigation // Applied Energy. 2020. Vol. 258. P. 114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
7. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 1 (77). С. 120–134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK.
8. Şanal İ. Significance of concrete production in terms of carbondioxide emissions: Social and environmental impacts // Journal of Polytechnic. 2018. Vol. 21. Issue 2. Pp. 369–378. DOI: 10.2339/politeknik.389590
9. Сухинина Е.А. Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 2. С. 186–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201. EDN GMYLCK.
10. Токарев В.А., Кабалин М.Д., Грищенко М.С., Конорева О.В. Переработанный бетон как компонент для изготовления асфальтобетонной смеси : Обзор // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2024. № 2. С. 19–30. DOI: 10.15593/24111678/2024.02.02. EDN XLBMKG.
11. Gallagher L., Peduzzi P. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. UNEP, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33747.63526
12. Jang J.G., Park S.M., Chung S., Ahn J.W., Kim H.K. Utilization of circulating fluidized bed combustion ash in producing controlled low-strength materials with cement or sodium carbonate as activator //

Construction and Building Materials. 2018. Vol. 159. Pp. 642–651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.158

13. Ricciardi P., Cillari G., Miino M.C., Collivignarelli M.C. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector : a review // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2020. Vol. 38. Issue 5. Pp. 487–513. DOI: 10.1177/0734242x20904426

14. Кузнецов В.А., Лесовик В.С. Техногенное сырье для дорожных покрытий // Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов. 2014. С. 115–118. EDN SCUPZT.

15. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Ахмед А.А.А., Оцок К.А. Бетоны для дорожного строительства с применением техногенных материалов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : II Междунар. онлайн-конгресс, посвящ. 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. 2019. С. 103–112. EDN XHSSDY.

16. Supino S., Malandrino O., Testa M., Sica D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. Pp. 430–442. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.022

17. Collivignarelli M.C., Cillari G., Ricciardi P., Miino M.C., Torretta V., Rada E.C. et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates : a review // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 19. P. 7903. DOI: 10.3390/su12197903

18. Khatib J.M., Herki B.A., Kenai S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 867–871. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.013

19. Наруть В.В., Ларсен О.А. Самоуплотняющиеся бетоны на основе бетонного лома сносимых жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 52–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXNIF.

20. Самченко С.В., Воронин В.В., Ларсен О.А., Наруть В.В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 71–78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78. EDN EYNTLL.

21. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 5 (113). DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.

22. Горчакова С.Д., Басалаев Н.А. Улучшение сборных бетонных бордюров с использованием резиновых и наноматериалов // Синергия Наук. 2017. № 11. С. 995–1004. EDN YQYYLP.

23. Thomas B.S., Gupta R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 54. Pp. 1323–1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092

24. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations : a review // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 155. P. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

25. Youssf O., Mills J.E., Hassanli R. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040

26. Zhu H., Rong B., Xie R., Yang Z. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 164. Pp. 644–654. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001

27. Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete : a review // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 2691–2700. DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.007

28. Marie I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 116. Pp. 217–222. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.096

29. Кисляков К.А., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н. Свойства цементной композиции с применением боя керамического кирпича и микрокремнезема // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 14–18. EDN XXHPX.

30. Денисевич Д.С., Димакова А.В., Шнайдер А.В., Ибе Е.Е. Физико-механические особенности материалов на основе бетонного лома // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3. С. 4. EDN OUIBCN.

31. Ламжав О. Исследование свойств вторичного заполнителя и бетона, изготовленного из бетонного лома // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : сб. ст. по мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 71–77. EDN YPXGZO.

32. Juan-Valdés A., Rodríguez-Robles D., García-González J., de Rojas M.I.S., Guerra-Romero M.I., Martínez-García R. et al. Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 22. P. 7007. DOI: 10.3390/ma14227007

33. Olofinnade O.M., Ede A.N., Ndambuki J.M., Bamigboye G. Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement // Materials Science Forum. 2016. Vol. 866. Pp. 63–67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.866.63

34. Heidari A., Hasanpour B. Effects of waste bricks powder of gachsaran company as a pozzolanic

material in concrete // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 14. Issue 5. Pp. 755–763.

35. *Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty A.E.M., Hassan H.H.* Utilization of crushed clay brick in concrete industry // *Alexandria Engineering Journal*. 2014. Vol. 53. Issue 1. Pp. 151–168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

36. *Ma Z., Tang Q., Wu H., Xu J., Liang C.* Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 114. P. 103758. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758

37. *Rens K.L.* Inventory and assessment of Denver, Colorado: Curb and gutters // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2007. Vol. 21. Issue 3. Pp. 249–254. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2007)21:3(249)

38. *Fityus S.G., Cameron D.A., Walsh P.F.* The shrink swell test // *Geotechnical Testing Journal*. 2005. Vol. 28. Issue 1. Pp. 92–101. DOI: 10.1520/gtj12327

39. *Mokhtari M., Dehghani M.* Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 17. Pp. 2673–2682.

40. *Johnson T.* Trees, Stormwater, Soil and Civil Infrastructure: Synergies Towards Sustainable Urban Design. 2017.

41. *Sun X., Li J., Cameron D., Zhou A.* Field monitoring and assessment of the impact of a large eucalypt on soil desiccation // *Acta Geotechnica*. 2022. Vol. 17. Issue 5. Pp. 1971–1984. DOI: 10.1007/s11440-021-01308-4

42. *Li J., Zhou Y., Guo L., Tokhi H.* The establishment of a field site for reactive soil and tree monitoring in Melbourne // *Australian Geomechanics Journal*. 2014. Vol. 49. Pp. 63–72.

43. *Singh A.K., Nigam M., Kumar R.* Srivastava Study of stress profile in cement concrete road of expansive soil due to swell pressure // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 347–355. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.184

44. *Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P.* Structural performance of fibre reinforced recycled aggregate concrete road kerb sections under monotonic and cyclic loading // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 438. P. 137329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137329

45. *Gayarre F.L., López-Colina C., Serrano M.A., López-Martínez A.* Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 40. Pp. 1193–1199. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.040

46. *Chen J., Liu L., Zhou M., Huang Z., Li R., Zhang Z. et al.* Study on durability of recycled large aggregate concrete // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 371. Issue 4. P. 042016. DOI: 10.1088/1755-1315/371/4/042016

47. *Gholampour A., Ozbakkaloglu T.* Time-dependent and long-term mechanical properties of con-

cretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 157. Pp. 224–234. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.015

48. *Mohammed A.S., Abbas A.L.* Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete Made from Known Properties Demolition Waste. 2019.

49. *Kou S., Poon C.* Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 501–508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035

50. *Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P.* Changes in flexural, tensile and impact characteristics of kerb concrete due to the addition of tyre-derived aggregates and polypropylene fibres // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 83. P. 108438. DOI: 10.1016/j.job.2024.108438

51. *Ларсен О.А., Марков Ю.И., Василькин А.А.* Свойства гипсовых композитов с использованием заполнителя из отходов переработки автомобильных шин // *Техника и технология силикатов*. 2024. Т. 31. № 4. С. 354–364. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-354-364. EDN KTYHWZ.

52. *Yang J., Du Q., Bao Y.* Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Issue 4. Pp. 1935–1945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063

53. *Marie I., Quiasrawi H.* Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 37. Pp. 243–248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020

54. *De Castro S., de Brito J.* Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 41. Pp. 7–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.021

55. *Ling T.C., Poon C.S.* Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 68. Pp. 209–215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.084

56. *Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S.* Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 91. Pp. 288–296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022

57. *Samchenko S.V., Larsen O.A.* Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 897. DOI: 10.3390/buildings13040897

58. *Youssf O., Mills J.E., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Roychand R. et al.* Development of crumb rubber concrete for practical application in the residential construction sector — design and processing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. P. 119813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119813

Поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 27 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Алексеевич Токарев — аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ResearcherID: HDO-5844-2022, ORCID: 0000-0002-3110-1440; tokareva161@mail.ru;

Максим Дмитриевич Кабалин — аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; maksipit13@gmail.com;

Михаил Сергеевич Грищенко — студент; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; mishal10944@yandex.ru;

Марина Алексеевна Высоцкая — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; roruri@rambler.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Korotkova A.S., Skobelkin Yu.A. Problems of construction waste disposal in Russia. *Youth and knowledge — a guarantee of success – 2022 : collection of scientific articles of the 9th International Youth Scientific Conference*. 2022; 19-22. EDN GLJKMM. (rus.).
2. Bjegovic D., Štirmer N., Serdar M. Ecological aspects of concrete production. *2nd International Conference on Sustainable construction materials and technologies*. 2010; 1483-1492.
3. Epifanov V.A., Vasileva E.V. Development of cement production in today's market. *Construction. Economics and Management*. 2016; 2(22):2-7. EDN YPJQB. (rus.).
4. Usov B.A., Okolnikova G.E., Akimov S.Yu. Ecology and production of construction materials. *System Technologies*. 2015; 4(17):84-105. EDN VLANJZ. (rus.).
5. Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazulla M.F., Palacios M., Gómez M.P. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites*. 2008; 30(9):798-805. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003
6. Röck M., Saade M.R.M., Balouktsi M., Rasmussen F.N., Birgisdottir H., Frischknecht R. et al. Embodied GHG emissions of buildings — the hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*. 2020; 258:114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
7. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(1):(77):120-134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK. (rus.).
8. Şanal İ. Significance of concrete production in terms of carbondioxide emissions: Social and environmental impacts. *Journal of Polytechnic*. 2018; 21(2):369-378. DOI: 10.2339/politeknik.389590
9. Sukhinina E.A. Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken of environmental standards. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(2):186-201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201. EDN GMYLCK. (rus.).
10. Tokarev V.A., Kabalin M.D., Grishchenko M.S., Konoreva O.V. Recycled concrete as a component for the production of asphalt concrete mixture : Review. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2024; 2:19-30. DOI: 10.15593/24111678/2024.02.02. EDN XLBMKG. (rus.).
11. Gallagher L., Peduzzi P. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. UNEP, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33747.63526
12. Jang J.G., Park S.M., Chung S., Ahn J.W., Kim H.K. Utilization of circulating fluidized bed combustion ash in producing controlled low-strength materials with cement or sodium carbonate as activator. *Construction and Building Materials*. 2018; 159:642-651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.158
13. Ricciardi P., Cillari G., Miino M.C., Collivignarelli M.C. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector : a review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2020; 38(5):487-513. DOI: 10.1177/0734242x20904426
14. Kuznetsov V.A., Lesovik V.S. Man-made raw materials for road surfaces. *Scientific and engineering*

problems of construction and technological utilization of man-made waste. 2014; 115-118. EDN SCUPZT. (rus.).

15. Lesovik V.S., Gridchin A.M., Murtazaev S.A.Yu., Saidumov M.S., Akhmed A.A.A., Otsokov K.A. Concretes for road construction using technogenic materials. *Nature-like technologies of building composites for protecting the human environment : II International Online Congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures*. 2019; 103-112. EDN XHSSDY. (rus.).

16. Supino S., Malandrino O., Testa M., Sica D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 112:430-442. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.022

17. Collivignarelli M.C., Cillari G., Ricciardi P., Miino M.C., Torretta V., Rada E.C. et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates : a review. *Sustainability*. 2020; 12(19):7903. DOI: 10.3390/su12197903

18. Khatib J.M., Herki B.A., Kenai S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*. 2013; 47:867-871. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.013

19. Naruts V.V., Larsen O.A. Self-compacting concrete on the basis of concrete scrap of demolished residential buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 2:52-58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXHIF. (rus.).

20. Samchenko S.V., Voronin V.V., Larsen O.A., Naruts V.V. Self-compacting concrete with compensated shrinkage based on recycled concrete materials. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2021; 2(746):71-78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78. EDN EYNTLL. (rus.).

21. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113). DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.

22. Gorchakova S.D., Basalaeв N.A. Improvement of precast concrete curbs using rubber and nanomaterials. *Synergy of Sciences*. 2017; 11:995-1004. EDN YQYYLP. (rus.).

23. Thomas B.S., Gupta R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 54:1323-1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092

24. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations : a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 155:104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

25. Youssif O., Mills J.E., Hassanli R. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber

concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 125:175-183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040

26. Zhu H., Rong B., Xie R., Yang Z. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 164:644-654. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001

27. Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete : a review. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(4):2691-2700. DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.007

28. Marie I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 116:217-222. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.096

29. Kislyakov K.A., Yakovlev G.I., Pervushin G.N. Properties of cement composition with addition of crushed clay brick and microsilica. *Construction Materials*. 2017; 1-2:14-18. EDN XXIHPX. (rus.).

30. Denisevich D.S., Dimakova A.V., Shnyder A.V., Ibe E.E. Physical and mechanical features of materials on the basis of concrete scrap. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(3):4. EDN OUJBCN. (rus.).

31. Lamzhav O. Study of the properties of secondary filler and concrete made from concrete scrap. *Experimental and theoretical research in modern science : collection of articles based on the materials of the VIII international scientific and practical conference*. 2017; 71-77. EDN YPXGZO. (rus.).

32. Juan-Valdés A., Rodríguez-Robles D., García-González J., de Rojas M.I.S., Guerra-Romero M.I., Martínez-García R. et al. Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways. *Materials*. 2021; 14(22):7007. DOI: 10.3390/ma14227007

33. Olofinnade O.M., Ede A.N., Ndambuki J.M., Bamigboye G. Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement. *Materials Science Forum*. 2016; 866:63-67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.866.63

34. Heidari A., Hasanpour B. Effects of waste bricks powder of gachsaran company as a pozzolanic material in concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2013; 14(5):755-763.

35. Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty A.E.M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014; 53(1):151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

36. Ma Z., Tang Q., Wu H., Xu J., Liang C. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 114:103758. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758

37. Rens K.L. Inventory and assessment of Denver, Colorado: Curb and gutters. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2007; 21(3):249-254. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2007)21:3(249)

38. Fityus S.G., Cameron D.A., Walsh P.F. The shrink swell test. *Geotechnical Testing Journal*. 2005; 28(1):92-101. DOI: 10.1520/gtj12327
39. Mokhtari M., Dehghani M. Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012; 17:2673-2682.
40. Johnson T. *Trees, Stormwater, Soil and Civil Infrastructure: Synergies Towards Sustainable Urban Design*. 2017.
41. Sun X., Li J., Cameron D., Zhou A. Field monitoring and assessment of the impact of a large eucalypt on soil desiccation. *Acta Geotechnica*. 2022; 17(5):1971-1984. DOI: 10.1007/s11440-021-01308-4
42. Li J., Zhou Y., Guo L., Tokhi H. The establishment of a field site for reactive soil and tree monitoring in Melbourne. *Australian Geomechanics Journal*. 2014; 49:63-72.
43. Singh A.K., Nigam M., Kumar R. Srivastava Study of stress profile in cement concrete road of expansive soil due to swell pressure. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:347-355. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.184
44. Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P. Structural performance of fibre reinforced recycled aggregate concrete road kerb sections under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2024; 438:137329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137329
45. Gayarre F.L., López-Colina C., Serrano M.A., López-Martínez A. Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. *Construction and Building Materials*. 2013; 40:1193-1199. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.040
46. Chen J., Liu L., Zhou M., Huang Z., Li R., Zhang Z. et al. Study on durability of recycled large aggregate concrete. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2019; 371(4):042016. DOI: 10.1088/1755-1315/371/4/042016
47. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. *Engineering Structures*. 2018; 157:224-234. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.015
48. Mohammed A.S., Abbas A.L. *Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete Made from Known Properties Demolition Waste*. 2019.
49. Kou S., Poon C. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2015; 77:501-508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.014.12.035
50. Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P. Changes in flexural, tensile and impact characteristics of kerb concrete due to the addition of tyre-derived aggregates and polypropylene fibres. *Journal of Building Engineering*. 2024; 83:108438. DOI: 10.1016/j.job.2024.108438
51. Larsen O., Markov Yu., Vasil'kin A. Properties of gypsum composites using aggregate from automobile tire recycling waste. *Technique and Technology of Silicates*. 2024; 31(4):354-364. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-354-364. EDN KTYHWZ. (rus.).
52. Yang J., Du Q., Bao Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(4):1935-1945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
53. Marie I., Quiasrawi H. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2012; 37:243-248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020
54. De Castro S., de Brito J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2013; 41:7-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.021
55. Ling T.C., Poon C.S. Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*. 2014; 68:209-215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.084
56. Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 91:288-296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022
57. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. *Buildings*. 2023; 13(4):897. DOI: 10.3390/buildings13040897
58. Youssf O., Mills J.E., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Roychand R. et al. Development of crumb rubber concrete for practical application in the residential construction sector — design and processing. *Construction and Building Materials*. 2020; 260:119813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119813

Received December 19, 2024.

Adopted in revised form on March 27, 2025.

Approved for publication on March 27, 2025.

BIONOTES: Vladimir A. Tokarev — postgraduate student of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov); 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ResearcherID: HDO-5844-2022, ORCID: 0000-0002-3110-1440; tokareva161@mail.ru;

Maksim D. Kabalin — postgraduate student of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; maksipit13@gmail.com;

Mihail S. Grishchenko — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; mishal10944@yandex.ru;

Marina A. Vysotskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; roruri@rambler.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflict of interest.