

Композиционный бетон с применением вторичного полимерного сырья: систематический обзор

Анастасия Александровна Павловская¹, Анастасия Олеговна Носова²,
Майя Валерьевна Успенская^{1,3}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Национальный исследовательский университет ИТМО; г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. С увеличением производства пластмасс и ростом объемов пластиковых отходов проблема их переработки приобретает все большую актуальность. Использование вторичных полимеров в строительной отрасли способствует более рациональному потреблению природных ресурсов, а также снижению затрат на производство строительных материалов. Проведен обзор с целью исследования изменений физико-механических характеристик композиционного бетона с применением отходов полипропилена (ПП) и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) в качестве мелкого и крупного заполнителя.

Материалы и методы. Выполнены анализ, обобщение и систематизация данных из открытых отечественных и зарубежных источников. Изучен практический опыт использования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона для оценки влияния уровня замены традиционного заполнителя отходами ПП и ПЭВП на прочностные свойства бетона.

Результаты. Систематизированы сведения о характеристиках используемых пластиковых отходов, технологиях изготовления композиционного бетона и его свойствах. Осуществлен сравнительный анализ изменения прочностных характеристик бетона в зависимости от параметров замещения природного заполнителя вторичными ПП и ПЭВП.

Выводы. Анализ научной литературы, посвященной вопросам применения пластиковых отходов в производстве бетона, демонстрирует значительный потенциал данной области исследований. Наибольшую целесообразность имеет использование вторичных ПЭВП и ПП ввиду их широкой распространенности и простоты переработки. При введении данных отходов в состав бетонной смеси наблюдается общая тенденция к снижению прочности материала при увеличении их количества, однако в отдельных случаях может происходить улучшение этого показателя по сравнению с контрольными образцами. Актуальным представляется дальнейшее изучение физико-механических характеристик бетона с использованием смеси отходов ПП и ПЭВП, а также определение оптимальных пропорций компонентов и технологии производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционный бетон, пластиковый заполнитель, полимерные отходы, полипропилен, полиэтилен высокой плотности, вторичное сырье, прочностные характеристики

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Павловская А.А., Носова А.О., Успенская М.В. Композиционный бетон с применением вторичного полимерного сырья: систематический обзор // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 931–963. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.931-963

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Александровна Павловская, pavlovskaa.aa@gmail.com.

Concrete composites incorporating recycled polymer materials: a systematic review

Anastasiya A. Pavlovskaya¹, Anastasiia O. Nosova², Mayya V. Uspenskaya^{1,3}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint Petersburg, Russian Federation;

² ITMO University; Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Saint-Petersburg State University; Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. With the growth of plastic production and the accumulation of plastic waste, recycling is becoming increasingly important. The incorporation of recycled polymers in the construction industry promotes a more rational use of natural resources and can reduce the cost of building materials. This article reviews studies examining changes in the physical and mechanical properties of concrete composites containing polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE) waste used as partial replacements for fine and coarse aggregates.

Materials and methods. A systematic analysis, generalization, and synthesis of data from open-access Russian and international sources were performed. Practical experience in the use of recycled polymers for producing concrete composites was examined to assess the effect of replacing conventional aggregates with PP and HDPE waste on the strength properties of concrete.

Results. Data on the characteristics of plastic waste, technologies for manufacturing concrete composites, and the resulting material properties were systematized. The authors conducted a comparative analysis of changes in the strength characteristics of concrete depending on the parameters of natural aggregate replacement with recycled PP and HDPE.

Conclusions. Analysis of the scientific literature on the application of plastic waste in concrete production demonstrates the significant potential of this research area. The use of recycled HDPE and PP appears particularly feasible because of their widespread availability and ease of processing. When these wastes are incorporated into concrete mixtures, material strength generally decreases with increasing waste content. However, in some cases, strength improvements compared with control specimens have been reported. Further research on the physical and mechanical properties of concrete containing combined PP and HDPE waste, as well as the determination of optimal component proportions and production technologies, remains relevant.

KEYWORDS: concrete composite, plastic aggregate, plastic waste, polypropylene, high-density polyethylene, recycled material, strength characteristics

FOR CITATION: Pavlovskaya A.A., Nosova A.O., Uspenskaya M.V. Concrete composites incorporating recycled polymer materials: a systematic review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):931-963. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.931-963 (rus.).

Corresponding author: Anastasiya A. Pavlovskaya, pavlovskaya.aa@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Пластмассы играют важную роль в различных отраслях промышленности. Из них производят множество товаров, что обусловлено их широким применением. Однако рост производства первичных пластмасс, наблюдаемый в последние годы, приводит к увеличению объемов пластиковых отходов. Так как пластик практически не разлагается биологически и содержит токсичные вещества, он служит серьезным источником загрязнения, накопление которого неизбежно приведет к экологической катастрофе [1–4]. Поэтому утилизация пластиковых отходов представляет собой актуальную проблему.

В отличие от захоронения и сжигания, которые наносят значительный вред природе, загрязняя почву, грунтовые воды и атмосферу, переработка и повторное использование — наиболее предпочтительные способы утилизации. Рециклинг не только способствует сокращению объема образующихся отходов, но и позволяет извлекать ценные для различных отраслей экономики вторичные ресурсы [5–8]. Тем не менее в России практика переработки пластиковых отходов до сих пор не получила широкого распространения. Более высокими уровнями сбора и утилизации обладают отходы полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП) — 20 и 17 % соответственно. Для полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полистирола данный показатель составил 12 %, а для поливинилхлорида (ПВХ) — 10 % [9, 10].

Отходы полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и ПП помимо высоких показателей сбора и утилизации также являются наиболее простыми для переработки, так как не требуют сложных методов подготовки, поскольку не испытывали значительных нагрузок в процессе эксплуатации. Кроме того, они более устойчивы к атмосферным воздействиям, чем полиэтилен низкой плотности [11–13].

Также стоит отметить, что ПЭ и ПП — наиболее распространенные виды пластика. На изделия из ПЭ приходится 24 % всего объема производства пласт-

масс, а из ПП — 16,6 %. В то время как ПВХ составляет 11,4 %, полиуретан — 5,5 %, полистирол — 6,1 % и ПЭТ — 5,3 % [14]. Эти данные свидетельствуют о значительной доле отходов, образующихся в результате использования ПЭ и ПП, что, в свою очередь, создает обширную базу для вторичного использования данного сырья.

В настоящее время строительная индустрия характеризуется активным развитием, что приводит к увеличению спроса на строительные материалы. Использование вторичного полимерного сырья для их производства способствует оптимизации потребления природных ресурсов и снижению затрат на утилизацию отходов. Это позволяет уменьшить себестоимость материалов и расходы на их транспортировку [15–19].

Бетон — один из востребованных строительных материалов. Использование в его составе отходов пластмасс может улучшить некоторые свойства, такие как теплопроводность, износостойкость, устойчивость к эрозии и химическим воздействиям. Также добавление вторичных полимеров помогает уменьшить усадку и предотвратить образование микротрещин. Применение бетонов с использованием полимерных отходов может быть перспективным в производстве напольных покрытий, элементов мощения, фасадных панелей и стеновых блоков [20–30]. В связи с этим в последние годы наблюдается рост числа научных публикаций, посвященных изучению композиционного бетона с добавлением вторичных полимеров.

На рис. 1 показан график изменения количества опубликованных научных работ за 2014–2024 гг., созданный при помощи сайта Dimensions¹. Поиск статей был осуществлен по таким ключевым словам, как concrete, plastic waste, recycled plastic, plastic aggregate, mechanical properties и workability properties. Согласно графику, с 2014 по 2024 г. число

¹ Dimensions. URL: <https://www.dimensions.ai/>

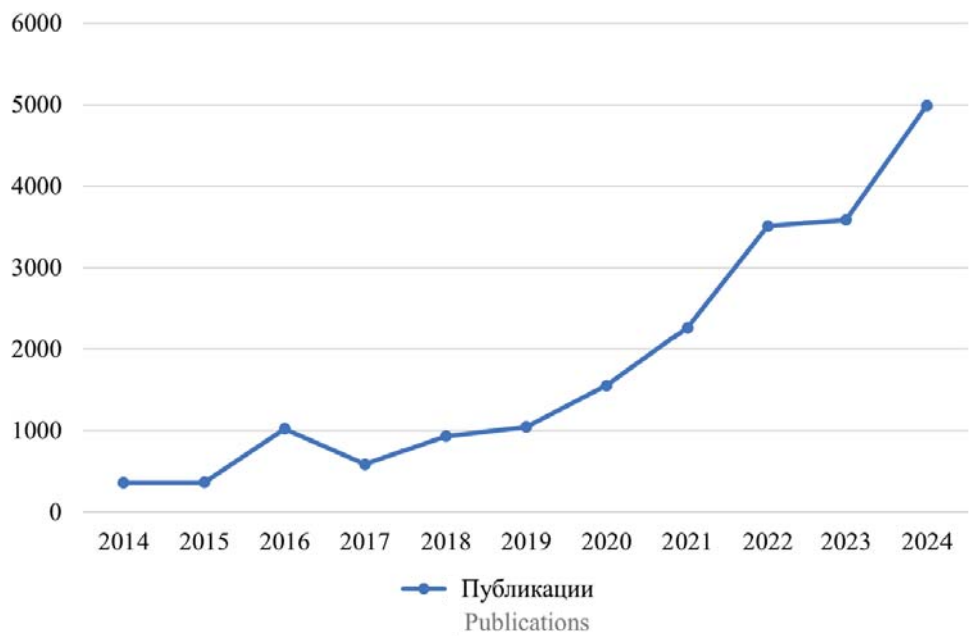


Рис. 1. Количество публикаций по теме применения вторичных полимеров для изготовления композиционного бетона за 2014–2024 гг.

Fig. 1. Number of publications on the use of secondary polymers in composite concrete production, 2014–2024

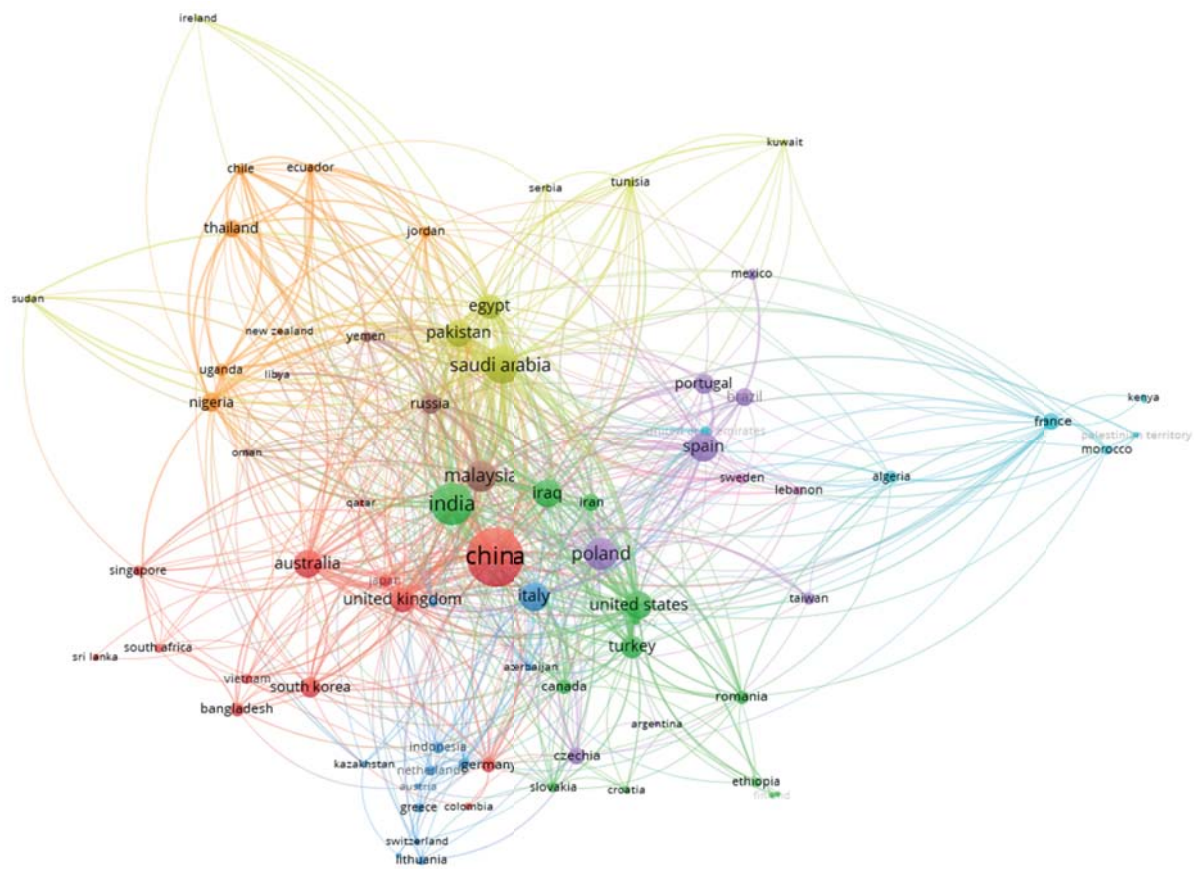


Рис. 2. Международное сотрудничество в области научных исследований по теме использования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона

Fig. 2. International research collaboration on the use of secondary polymers in the production of composite concrete

публикаций увеличилось в 13,7 раз с 364 до 4989 соответственно.

Анализ сотрудничества в области публикационной активности также демонстрирует растущий интерес к теме использования полимерных отходов для получения композиционного бетона со стороны различных стран и регионов. На рис. 2, созданном в программе VOSviewer на основе загруженной с сайта Dimensions базы данных статей, опубликованных с 2020 по 2025 г., отображено международное сотрудничество в сфере научных публикаций, посвященных этому вопросу. Он наглядно демонстрирует, что Китай, Индия и Саудовская Аравия занимают лидирующие позиции по количеству публикаций в этой области. Наиболее тесное сотрудничество наблюдается между Китаем и Австралией, Саудовской Аравией и Малайзией, а также у Пакистана и Египта с Саудовской Аравией. В России количество опубликованных научных работ за рассматриваемый период значительно меньше, а наиболее активное взаимодействие осуществлялось с Саудовской Аравией и Малайзией.

Таким образом, все вышесказанное подтверждает актуальность изучения вопроса применения вторичного ПП и ПЭВП для изготовления бетона. В настоящей статье анализируется изменение физико-механических свойств композиционного бетона при использовании отходов ПП и ПЭВП.

Цель исследования — сбор и обобщение практического опыта изготовления данного материала, а также результатов его испытаний для оценки влияния степени замещения традиционного заполнителя вторичными ПП и ПЭВП на прочностные характеристики бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследования проведен анализ научных публикаций, посвященных применению вторичного полимерного сырья для производства бетонных изделий. В качестве основных источников информации были использованы: российская электронная библиотека eLIBRARY и зарубежная научная база данных Scopus. Отбор публикаций осуществлялся с учетом временного критерия: рассматривались работы, опубликованные за последние 10 лет.

В результате обзора литературы систематизированы все данные о характеристиках используемых пластиковых отходов, а также о технологии изготовления композиционного бетона и полученных значений его физико-механических свойств. Это позволило выполнить сравнительный анализ и выявить общие тенденции изменения основных параметров материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа научных работ можно судить о высоком интересе к проблематике ис-

пользования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона. Стоит отметить, что количество иностранных публикаций значительно превосходит отечественные. При этом зарубежные исследования в этой области в основном носят экспериментальный характер в отличие от российских, которые, в свою очередь, преимущественно сосредоточены на теоретических аспектах, а также обобщении и анализе существующих публикаций [15, 20, 31–33].

Основными физико-механическими свойствами, характеризующими бетон, являются плотность, удобоукладываемость, прочность на сжатие, прочность на растяжение при раскалывании, прочность на изгиб, а также теплопроводность, водопоглощение, морозостойкость, и истираемость. Значения этих параметров определяют качество материала и допустимые виды его применения. Именно поэтому анализ вышеперечисленных характеристик становится неотъемлемой частью исследований, посвященных влиянию пластиковых отходов на свойства композиционного бетона. В табл. 1–3 отражены изменения свойств бетона при добавлении в него вторичных полимеров в разных количествах и размерах.

Анализ данных, представленных в табл. 1–3, позволяет констатировать, что наиболее глубоко исследованы свойства бетона, содержащего отходы одного вида полимеров, таких как ПП и ПЭВП. Лишь в небольшом проценте исследований рассматривается бетон с добавлением смеси различных полимеров.

Пластиковые отходы могут быть включены в бетонную смесь в качестве мелкого и крупного заполнителя, а также использоваться в виде волокон [57–59]. В работах, посвященных изучению бетона с добавлением полимерных волокон, их содержание составляет 0,25–1,5 % [34, 42, 44, 46]. Количество полимерных отходов, добавляемое в качестве мелкого заполнителя, составляет 0,5–75 % [35, 36, 40–42, 45, 48–50, 54]. А содержание вторичных полимеров в крупном заполнителе рассматривается в диапазоне 1–60 % [37–39, 43, 49, 51–53]. Таким образом, целесообразным будет являться изучение бетона, содержащего смесь вторичного ПП и вторичного ПЭВП в качестве заполнителя.

Во всех публикациях, освещающих практический опыт применения пластиковых отходов в качестве заполнителя для бетонной смеси и свойства полученного материала, авторы определяли прочностные характеристики образцов, такие как прочность на сжатие и в некоторых случаях прочность на растяжение при раскалывании и на изгиб.

На рис. 3 представлены графики, отражающие изменение прочности на сжатие бетона, содержащего отходы из ПП в качестве мелкого и крупного заполнителя соответственно.

На основании представленной на рис. 3 информации представляется возможным сделать вывод

Табл. 1. Свойства бетона, содержащего отходы ПП

Table 1. Properties of concrete containing polypropylene waste

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
4 × 50	0,25–0,75	• прочность на сжатие увеличилась на 20,75 и 10,91 % при добавлении 0,25 и 0,5 % отходов ПП соответственно. Содержание 0,75 % вторичного ПП привело к уменьшению данного показателя на 10,91 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 5,25–46,35 % • 0.25 and 0.5 % of PP waste added to the concrete mix rose compressive strength by 20.75 and 10.91 %, respectively. 0.75 % of secondary PP reduced compressive strength by 10.91 %; • flexural strength reduced by 5.25–46.35 %	З.А. Алиев [34] Z.A. Aliev [34]
3	10–40	• прочность на сжатие уменьшилась на 25,86–58,06 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 0,78–45,88 %; • осадка конуса уменьшилась на 1,22 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Добавление 20–30 % отходов из ПП привело к увеличению осадки конуса на 2,44–7,32 %; • плотность образцов уменьшилась на 2,20–10,59 % • compressive strength reduced by 25.86–58.06 %; • splitting tensile strength reduced by 0.78–45.88 %; • 10 % of recycled PP reduced slump by 1.22 %. 20–30 % of PP waste rose slump by 2.44–7.32 %; • the specimen density decreased by 2.20–10.59 %	М. Sofyan и соавт. [35] M. Sofyan et al. [35]
–	8–40	• прочность на сжатие уменьшилась на 5,88–41,18 %; • осадка конуса уменьшилась на 53,8–80,7 %; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 3,6–12,3 %; • теплопроводность уменьшилась на 6,6–49,1 % • compressive strength decreased by 5.88–41.18 %; • slump decreased by 53.8–80.7 %; • density of the concrete mix decreased by 3.6–12.3 %; • thermal conductivity of the concrete mix decreased by 6.6–49.1 %	S.N. Ahmed и соавт. [36] S.N. Ahmed et al. [36]
≤4,75	20–60	• прочность на сжатие уменьшилась на 3,34–11,19 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 4,96–22,74 % • compressive strength decreased by 3.34–11.19 %; • split tensile strength decreased by 4.96–22.74 %	D.C. Naveen и соавт. [37] D.C. Naveen et al. [37]
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 17,81–42,5 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,41–35,2 %; • содержание отходов ПП в количестве 10 % привело к увеличению осадки конуса на 7,14 %. При добавлении 20 % осадка конуса не отличалась от значения смеси, не содержащей полимерные отходы. При добавлении 30 % данный показатель уменьшился на 18,75 %; • водопоглощение увеличилось на 7,33–13,14 %; • при добавлении 10–20 % отходов износостойкость уменьшилась на 22,93–6,69 %. Добавление 30 % вторичного ПП увеличило данный показатель на 10,51 % • compressive strength decreased by 17.81–42.5 %; • flexural strength decreased by 18.41–35.2 %; • a 10 % PP waste content led to a 7.14 % increase in slump. At 20 % PP waste content, the slump was comparable to that of the reference concrete mix without polymer waste. However, with 30 % PP waste addition, the slump decreased by 18.75 %; • water absorption increased by 7.33–13.14 %; • the incorporation of 10–20 % polymer waste reduced wear resistance by 6.69–22.93 %, whereas the addition of 30 % recycled PP increased this property by 10.51 %	М. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 5,39 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Добавление 20–30 % отходов привело к уменьшению данного показателя на 16,22–15,43 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 9,45 и 0,5 % при добавлении 10 и 30 % вторичного ПП соответственно; • содержание отходов в количестве 20 % привело к увеличению данного показателя на 16,92 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 11,43–5,71 %; • увеличение количества отходов уменьшает осадку конуса бетона • compressive strength increased by 5.39 % with the addition of 10 % recycled PP. However, the addition of 20–30 % recycled PP reduced compressive strength by 16.22–15.43 %, respectively; • splitting tensile strength decreased by 9.45 and 0.50 % with the addition of 10 and 30 % recycled PP, respectively, whereas the incorporation of 20 % recycled PP increased this property by 16.92 %; • flexural strength decreased by 5.71–11.43 %; • increasing the recycled PP content reduced the slump	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	5–25	• прочность на сжатие уменьшилась на 10,05–57,94 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 4,45–37 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 9,33–53,33 %; • осадка конуса уменьшилась на 16,67 и 8,33 % при добавлении 5 и 15 % вторичного ПП соответственно. Содержание отходов в количестве 10, 20 и 25 % привело к увеличению данного показателя на 25, 8,33 и 25 % соответственно • compressive strength decreased by 10.05–57.94 %; • splitting tensile strength decreased by 4.45–37.00 %; • flexural strength decreased by 9.33–53.33 %; • slump decreased by 16.67 and 8.33 % with the addition of 5 and 15 % secondary PP, respectively; • secondary PP contents of 10, 20, and 25 % increased this property by 25.00, 8.33 and 25.00 %, respectively	M. Harihanandh и соавт. [40] M. Harihanandh et al. [40]
0–3; 3–8	25–75	• прочность на сжатие уменьшилась на 27,43–85,14 %; • модуль упругости уменьшился на 29,23–85,08 %; • увеличение количества отходов уменьшает осадку конуса бетона; Содержание 75 % вторичного ПП уменьшило данный показатель на 46 %; • теплопроводность уменьшилась на 28,49–66,13 % • compressive strength decreased by 27.43–85.14 %; • elastic modulus decreased by 29.23–85.08 %; • increasing the amount of waste reduces the slump; the incorporation of 75 % recycled PP reduced this property by 46 %; • thermal conductivity decreased by 28.49–66.13 %	M. Belmokaddem и соавт. [41] M. Belmokaddem et al. [41]
1,1 × 0,6	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 14,6 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 75,16–9,8 %; • осадка конуса уменьшилась на 24–22,8 % • compressive strength decreased by 14.6 %; • the split tensile strength increased by 75.16–9.8 %; • the slump decreased by 24–22.8 %	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,4 × 0,1		• прочность на сжатие уменьшилась на 11,40–22,53 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 52,28–36,6 %; • осадка конуса уменьшилась на 16–15,2 % • compressive strength decreased by 11.40–22.53 %; • splitting tensile strength increased by 52.28–36.6 %; • slump decreased by 16–15.2 %	

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
≤19	10–30	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,42 увеличилась на 10,71 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Содержание отходов в количестве 20–30 % уменьшило данный показатель на 14,29–21,43 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,48 увеличилась на 38,46–7,69 %, для бетона с соотношением 0,57 увеличилась на 34,48–30,34 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,42 увеличилась на 1,49 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Содержание отходов в количестве 20–30 % уменьшило данный показатель на 1,49–13,43 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,48 уменьшилась на 11,43–28,57 %, для бетона с соотношением 0,57 уменьшилась на 21,88–34,38 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.42 increased by 10.71% with the addition of 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 20–30 % reduced this property by 14.29–21.43 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.48 increased by 7.69–38.46 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.57 increased by 30.34–34.48 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.42 increased by 1.49 % with the addition of 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 20–30 % reduced this property by 1.49–13.43 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.48 decreased by 11.43–28.57 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.57 decreased by 21.88–34.38 %	M.J. Islam [43] M.J. Islam [43]
0,038 × 13	0,25–0,75	• прочность на сжатие уменьшилась на 18,5 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 28,4–83,4 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 19,2 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 47,5–72,4 %; • осадка конуса уменьшилась на 4,4 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 5,5–10 % • compressive strength decreased by 18.5 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 28.4–83.4 %; • flexural strength decreased by 19.2 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 47.5–72.4 %; • slump decreased by 4.4 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 5.5–10 %	S.Z. Abeer и соавт. [44] S.Z. Abeer et al. [44]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 3,67 % при добавлении 2,5 % вторичного ПП. Содержание 5–10 % отходов увеличило данный показатель на 2,37–9,28 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 9,81, 0,47 и 0,7 % при добавлении 2,5, 7,5 и 10 % вторичного ПП соответственно. Содержание 5 % отходов увеличило данный показатель на 7,24 %; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 8,12 % при добавлении 2,5 и 10 % вторичного ПП. Содержание 5–7,5 % отходов увеличило данный показатель на 2,71–10 %; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 1,92 и 5,77 % при добавлении 2,5 и 10 % вторичного ПП. Содержание 5–7,5 % отходов увеличило данный показатель на 5,19–12,69 %	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
≤27,5	2,5–10	• the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 3.67 % with the addition of 2.5 % recycled PP. Recycled PP contents of 5–10 % increased this property by 2.37–9.28 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 9.81 %, 0.47 %, and 0.70 % with the addition of 2.5 %, 7.5 %, and 10 % recycled PP, respectively. The incorporation of 5 % recycled PP increased this property by 7.24 %; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 8.12 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 5–7.5 % increased this property by 2.71–10.00 %; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 1.92 and 5.77 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled PP, respectively. Recycled PP contents of 5–7.5 % increased this property by 5.19–12.69 %	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
31 × 1	0,5–1,5	• прочность на сжатие бетона с добавлением измельченного полипропиленового волокна увеличилась на 43,4–69,7 %; • прочность на сжатие бетона с добавлением полипропиленового волокна, модифицированного с помощью экструдера, увеличилась на 43,4–62,6 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с измельченным волокном увеличилась в 2,2–4,8 раз; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, увеличилась в 2,1–4,1 раз; • прочность на изгиб бетона с измельченным полипропиленовым волокном увеличилась в 2,2–2,8 раз; • прочность на изгиб бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, увеличилась в 1,4–1,6 раз; • осадка конуса бетона с измельченным волокном уменьшилась на 22,9–85,7 %; • осадка конуса бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, уменьшилась на 14,3–62,9 % • the compressive strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 43.4–69.7 %; • the compressive strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 43.4–62.6 %; • the splitting tensile strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 2.2–4.8 times; • the splitting tensile strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 2.1–4.1 times; • the flexural strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 2.2–2.8 times; • the flexural strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 1.4–1.6 times; • the slump of concrete containing crushed polypropylene fiber decreased by 22.9–85.7 %; • the slump of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber decreased by 14.3–62.9 %	M. Malek и соавт. [46] M. Malek et al. [46]
3 × 3 × 3	10–30	• осадка конуса у смеси с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 18,57–27,14 %, у смеси с водоцементным соотношением 0,55 — на 16–25,33 %; • плотность у образцов с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 6,39–11,44 %, у образцов с водоцементным соотношением 0,55 — на 3,22–10,88 %; • прочность на сжатие у образцов с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 20–48 %, у образцов с водоцементным соотношением 0,55 — на 29–44 % • the slump of the concrete mix with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 18.57–27.14 %, while that of the mix with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 16.00–25.33 %; • the density of specimens with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 6.39–11.44 %, while that of specimens with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 3.22–10.88 %; • the compressive strength of specimens with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 20–48 %, while that of specimens with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 29–44 %	A.O. Irlan и соавт. [47] A.O. Irlan et al. [47]

Табл. 2. Свойства бетона, содержащего отходы ПЭВП

Table 2. Properties of concrete containing high-density polyethylene waste

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	5–30	• прочность на сжатие увеличилась на 6,13 % при добавлении 15 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 10,67–23,96 % при добавлении 5–10 % отходов и на 20,15–32,3 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 14,58–36,44 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,54–44,13 %; • водопоглощение уменьшилось на 22,67–80,64 %; • осадка конуса уменьшилась на 15,63–62,5 % • compressive strength increased by 6.13 % with the addition of 15 % recycled HDPE. However, it decreased by 10.67–23.96 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE and by 20.15–32.30 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • splitting tensile strength decreased by 14.58–36.44 %; • flexural strength decreased by 18.54–44.13 %; • water absorption decreased by 22.67–80.64 %; • the slump decreased by 15.63–62.50 %	V. Punitha и соавт. [48] Punitha V. et al. [48]
2–10	10–50	• прочность на сжатие уменьшилась на 22–82 %; • модуль упругости уменьшился на 19–47 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–33 % • compressive strength decreased by 22–82 %; • elastic modulus decreased by 19–47 %; • thermal conductivity decreased by 10–33 %	M.A. Al-Osta и соавт. [49] M.A. Al-Osta et al. [49]
0,5–2		• прочность на сжатие уменьшилась на 11–72 %; • модуль упругости уменьшился на 17–39 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–26 % • compressive strength decreased by 11–72 %; • elastic modulus decreased by 17–39 %; • thermal conductivity decreased by 10–26 %	
0,5–2; 2–10		• прочность на сжатие уменьшилась на 18–77 %; • модуль упругости уменьшился на 20–48 %; • теплопроводность уменьшилась на 8–21 % • compressive strength decreased by 18–77 %; • elastic modulus decreased by 20–48 %; • thermal conductivity decreased by 8–21 %	
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 19,69–40 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 17,49–30,3 %; • водопоглощение увеличилось 7,33–11,34 %; • износостойкость увеличилась на 14,01–51,91 %; • осадка конуса увеличилась на 9,84 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 5,36–15,18 % при добавлении 20–30 % отходов; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 5,2–10,6 % • compressive strength decreased by 19.69–40 %; • flexural strength decreased by 17.49–30.3 %; • water absorption increased by 7.33–11.34 %; • wear resistance increased by 14.01–51.91 %; • the slump increased by 9.84 % with the addition of 10 % recycled HDPE. However, it decreased by 5.36–15.18 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • density of the concrete mixture decreased by 5.2–10.6 %	M. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 4,93 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 15,13–32,57 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,49 % при добавлении 30 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 1,49–27,36 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на изгиб уменьшилась на 7,43–25,71 % • compressive strength increased by 4.93 % with the addition of 10 % recycled HDPE. However, it decreased by 15.13–32.57 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 2.49 % with the addition of 30 % recycled HDPE. However, it decreased by 1.49–27.36% with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • flexural strength decreased by 7.43–25.71 %	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	1–7	• прочность на сжатие уменьшилась на 2,73–9,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 1,17–2,92 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 0,29–3,8 % при добавлении 5–7 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 5,6–12,39 % • compressive strength decreased by 2.73–9.98 %; • splitting tensile strength increased by 1.17–2.92 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 0.29–3.80 % with the addition of 5–7 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 5.60–12.39 %	T. Liu и соавт. [50] T. Liu et al. [50]
2–4	1–15	• прочность на сжатие увеличилась на 0,29–4,33 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 7,21–18,26 % при добавлении 7–15 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,63–7,02 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 8,48–14,33 % при добавлении 7–15 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 6,58–12,36 % • compressive strength increased by 0.29–4.33 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. However, it decreased by 7.21–18.26 % with the addition of 7–15 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 2.63–7.02 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. However, it decreased by 8.48–14.33 % with the addition of 7–15 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 6.58–12.36 %	
≤10	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 14–33 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 4–11 %; • прочность на изгиб увеличилась на 36–49 % • compressive strength decreased by 14–33 %; • splitting tensile strength increased by 4–11 %; • flexural strength increased by 36–49 %	M.M. Radhi и соавт. [51] M.M. Radhi et al. [51]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	1–5	• прочность на сжатие увеличилась на 3,19–22,9 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 12,25–13,8 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 17,34–84,6 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 18,3–26,1 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на изгиб увеличилась на 1,13–7,95 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 4,31–8,63 % при добавлении 4–5 % отходов • compressive strength increased by 3.19–22.90 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 12.25–13.80 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 17.34–84.60 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 18.30–26.10 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE; • flexural strength increased by 1.13–7.95 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 4.31–8.63 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE	T.M. Selvi и соавт. [52] T.M. Selvi et al. [52]
0,45 × 40	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 13,35–18,78 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 9,15–14,38 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 12–14 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • compressive strength decreased by 13.35–18.78 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 9.15–14.38 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 12–14 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,5 × 40		• прочность на сжатие уменьшилась на 5,7–15,30 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 20,26–32,03 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 20,4–23,2 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • compressive strength decreased by 5.70–15.30 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • split tensile strength increased by 20.26–32.03 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • slump of the concrete mix decreased by 20.4–23.2 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	
0–3, 3–8	25–75	• увеличение количества ПЭВП в смеси привело к снижению плотности бетона. Максимальное снижение плотности — 46 % при добавлении 75 % отходов; • прочность на сжатие уменьшилась на 44,29–88,57 %; • модуль упругости уменьшился на 32,3–84,92 %; • теплопроводность уменьшилась на 20,97–57,53 % • increasing the HDPE content in the mixture led to a decrease in concrete density. The maximum density reduction was 46 at 75 % waste content; • compressive strength decreased by 44.29–88.57 %; • the elastic modulus decreased by 32.30–84.92 %; • thermal conductivity decreased by 20.97–57.53 %	M. Belmokkadem и соавт. [41] M. Belmokkadem et al. [41]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
5 × 20	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 9,52–15,87 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,59 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 8–35 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 2–7,6 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 4 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17–26,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с соотношением 0,65 увеличилась на 3,33–13,33 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 6,67 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25–3,75 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–5 % при добавлении 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 и 0,65 уменьшилась на 4,17–11,67 % с соотношением 0,52 — на 3,33–13,33 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 9.52–15.87 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 1.59 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 8.00–35.00 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 2.00–7.60 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 4.00 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 3.17–26.98 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.33–13.33 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 6.67 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 1.25–3.75 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–5.00 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 4.17–11.67 %, while that of the mix with a water–cement ratio of 0.52 decreased by 3.33–13.33 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
10 × 10	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 6,35–17,46 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 2–14 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 0,4 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 3,6–11,2 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 7,94–19,05 %, с соотношением 0,65 — на 6,67–30 %, с соотношением 0,52 — увеличилась на 2,5 % при добавлении 5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–10 % при добавлении 2,5 % и 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 0,83–8,33 %, с соотношением 0,65 — на 0,83–9,17 %, с соотношением 0,52 — на 2,5–10 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 3.17 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 6.35–17.46 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 2.00–14.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, compressive strength increased by 0.40 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 3.60–11.20 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 7.94–19.05 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 6.67–30.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, splitting tensile strength increased by 2.50 % with the addition of 5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–10.00 % with the addition of 2.5 % and 10–20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95, 0.65, and 0.52 decreased by 0.83–8.33 %, 0.83–9.17 %, and 2.50–10.00 %, respectively	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
2,5 × 40		• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 1,59–14,29 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 12,7 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3–20 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 2–3,2 % при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,2–8 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 6,35–11,11% при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,59–4,76 % при добавлении 10–20 % отходов • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 1.59–14.29 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 12.70 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.00–20.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, compressive strength increased by 2.00–3.20 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.20–8.00 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 6.35–11.11 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.59–4.76 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE	

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 6, 2026
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 6, 2026

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
2,5 × 40	2,5–20	• прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3,33 % при добавлении 5 % и уменьшилась на 6,67–10 % при добавлении 2,5 и 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25 % при добавлении 5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,5–5 % при добавлении 2,5 и 20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 6,67–1,25 %, с соотношением 0,65 — на 3,33–15,83 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 8,33–16,67 % при добавлении 5–20 % отходов • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.33 % with the addition of 5 % recycled HDPE and decreased by 6.67–10.00 % with the addition of 2.5 and 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 1.25 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE and decreased by 2.50–5.00 % with the addition of 2.5 and 20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 1.25–6.67 % and 3.33–15.83 %, respectively. In the concrete mix with a water–cement ratio of 0.52, slump increased by 5.00 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and decreased by 8.33–16.67 % with the addition of 5–20 % recycled HDPE	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 увеличилась на 2,47–19,14 %, с соотношением 0,4 увеличилась на 2,57–4,67 при добавлении 5–7,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,34 и 4,44 % при добавлении 2,5 и 10 % отходов соответственно; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 7,5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 2,92–49,79 % при добавлении 5–10 % отходов; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 5,77 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 9,42–27,31 % при добавлении 5–10 % отходов • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 increased by 2.47–19.14 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.40, compressive strength increased by 2.57–4.67 % with the addition of 5–7.5 % recycled HDPE but decreased by 2.34 and 4.44 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled HDPE, respectively; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 7.50 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 2.92–49.79 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 5.77 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 9.42–27.31 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
3,75	10–34	• прочность на сжатие уменьшилась на 4,96–35,38 % • compressive strength decreased by 4.96–35.38 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	5–30	• прочность на сжатие увеличилась на 6,13 % при добавлении 15 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 10,67–23,96 % при добавлении 5–10 % отходов и на 20,15–32,3 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 14,58–36,44 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,54–44,13 %; • водопоглощение уменьшилось на 22,67–80,64 %; • осадка конуса уменьшилась на 15,63–62,5 % • the compressive strength increased by 6.13 % with the addition of 15 % recycled HDPE. This value decreased by 10.67–23.96 % with the addition of 5–10 % waste, and by 20.15–32.3 % with the addition of 20–30 % waste; • the split tensile strength decreased by 14.58–36.44 %; • the flexural strength decreased by 18.54–44.13 %; • the water absorption decreased by 22.67–80.64 %; • the slump decreased by 15.63–62.5 %	V. Punitha и соавт. [48] Punitha V. et al. [48]
2–10	10–50	• прочность на сжатие уменьшилась на 22–82 %; • модуль упругости уменьшился на 19–47 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–33 % • the compressive strength decreased by 22–82 %; • the elastic modulus decreased by 19–47 %; • the thermal conductivity decreased by 10–33 %	M.A. Al-Osta и соавт. [49] M.A. Al-Osta et al. [49]
0,5–2		• прочность на сжатие уменьшилась на 11–72 %; • модуль упругости уменьшился на 17–39 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–26 % • the compressive strength decreased by 11–72 %; • the elastic modulus decreased by 17–39 %; • the thermal conductivity decreased by 10–26 %	
0,5–2; 2–10		• прочность на сжатие уменьшилась на 18–77 %; • модуль упругости уменьшился на 20–48 %; • теплопроводность уменьшилась на 8–21 % • the compressive strength decreased by 18–77 %; • the elastic modulus decreased by 20–48 %; • the thermal conductivity decreased by 8–21 %	
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 19,69–40 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 17,49–30,3 %; • водопоглощение увеличилось 7,33–11,34 %; • износостойкость увеличилась на 14,01–51,91 %; • осадка конуса увеличилась на 9,84 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 5,36–15,18 % при добавлении 20–30 % отходов; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 5,2–10,6 % • the compressive strength decreased by 19.69–40 %; • the flexural strength decreased by 17.49–30.3 %; • the water absorption increased by 7.33–11.34 %; • the wear resistance increased by 14.01–51.91 %; • the slump increased by 9.84 % with the addition of 10 % recycled HDPE. This feature decreased by 5.36–15.18 % when adding 20–30 % waste; • the density of the concrete mixture decreased by 5.2–10.6 %	M. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 4,93 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 15,13–32,57 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,49 % при добавлении 30 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 1,49–27,36 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на изгиб уменьшилась на 7,43–25,71 % • the compressive strength increased by 4.93 % with the addition of 10 % recycled HDPE. This value decreased by 15.13–32.57 % when adding 20–30 % waste; • the split tensile strength increased by 2.49 % with the addition of 30 % recycled HDPE. This feature decreased by 1.49–27.36 % when adding 10–20 % waste; • the flexural strength decreased by 7.43–25.71 %	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	1–7	• прочность на сжатие уменьшилась на 2,73–9,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 1,17–2,92 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 0,29–3,8 % при добавлении 5–7 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 5,6–12,39 % • the compressive strength decreased by 2.73–9.98 %; • the split tensile strength increased by 1.17–2.92 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This value decreased by 0.29–3.8 % with the addition of 5–7 % waste; • the slump of the concrete mix decreased by 5.6–12.39 %	T. Liu и соавт. [50] T. Liu et al. [50]
2–4	1–15	• прочность на сжатие увеличилась на 0,29–4,33 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 7,21–18,26 % при добавлении 7–15 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,63–7,02 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 8,48–14,33 % при добавлении 7–15 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 6,58–12,36 % • the compressive strength increased by 0.29–4.33 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. This value decreased by 7.21–18.26 % when adding 7–15 % waste; • the split tensile strength increased by 2.63–7.02 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. This feature decreased by 8.48–14.33 % when adding 7–15 % waste; • the slump of the concrete mix decreased by 6.58–12.36 %	
≤10	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 14–33 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 4–11 %; • прочность на изгиб увеличилась на 36–49 % • the compressive strength decreased by 14–33 %; • the split tensile strength increased by 4–11 %; • the flexural strength increased by 36–49 %	M.M. Radhi и соавт. [51] M.M. Radhi et al. [51]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	1–5	• прочность на сжатие увеличилась на 3,19–22,9 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 12,25–13,8 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 17,34–84,6 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 18,3–26,1 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на изгиб увеличилась на 1,13–7,95 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 4,31–8,63 % при добавлении 4–5 % отходов • the compressive strength increased by 3.19–22.9 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This feature decreased by 12.25–13.8 % with the addition of 4–5 % waste; • the split tensile strength increased by 17.34–84.6 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This feature decreased by 18.3–26.1 % with the addition of 4–5 % waste; • the flexural strength increased by 1.13–7.95 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This value decreased by 4.31–8.63 % with the addition of 4–5 % waste	T.M. Selvi и соавт. [52] T.M. Selvi et al. [52]
0,45 × 40	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 13,35–18,78 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 9,15–14,38 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 12–14 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • the compressive strength decreased by 13.35–18.78 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the split tensile strength increased by 9.15–14.38 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 12–14 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,5 × 40		• прочность на сжатие уменьшилась на 5,7–15,30 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 20,26–32,03 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 20,4–23,2 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • the compressive strength decreased by 5.70–15.30 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the split tensile strength increased by 20.26–32.03 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 20.4–23.2 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	
0–3, 3–8	25–75	• увеличение количества ПЭВП в смеси привело к снижению плотности бетона. Максимальное снижение плотности — 46 % при добавлении 75 % отходов; • прочность на сжатие уменьшилась на 44,29–88,57 %; • модуль упругости уменьшился на 32,3–84,92 %; • теплопроводность уменьшилась на 20,97–57,53 % • increasing the amount of HDPE in the mixture led to a decrease in concrete density. The maximum density reduction was 46 with 75 % waste addition; • the compressive strength decreased by 44.29–88.57 %; • the elastic modulus decreased by 32.3–84.92 %; • the thermal conductivity decreased by 20.97–57.53 %	M. Belmokaddem и соавт. [41] M. Belmokaddem et al. [41]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
5 × 20	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 9,52–15,87 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,59 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 8–35 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 2–7,6 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 4 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17–26,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с соотношением 0,65 увеличилась на 3,33–13,33 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 6,67 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25–3,75 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–5 % при добавлении 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 и 0,65 уменьшилась на 4,17–11,67 % с соотношением 0,52 — на 3,33–13,33 % • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 9.52–15.87 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 1.59 % with the addition of 20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 8–35 %; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 2–7.6 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 4 % with the addition of 20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 3.17–26.98 %; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3.33–13.33 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 6.67 % with the addition of 20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 1.25–3.75 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–5 % with the addition of 10–20 % waste; • the slump of the concrete mix with water-cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 4.17–11.67 %, and with a ratio of 0.52 by 3.33–13.33 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
10 × 10	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 6,35–17,46 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 2–14 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 0,4 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 3,6–11,2 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 7,94–19,05 %, с соотношением 0,65 — на 6,67–30 %, с соотношением 0,52 — увеличилась на 2,5 % при добавлении 5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–10 % при добавлении 2,5 % и 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 0,83–8,33 %, с соотношением 0,65 — на 0,83–9,17 %, с соотношением 0,52 — на 2,5–10 % • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 3.17 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE, and decreased by 6.35–17.46 % with the addition of 10–20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 2–14 %, and with a ratio of 0.52 increased by 0.4 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE, decreased by 3.6–11.2 % with the addition of 10–20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 7.94–19.05 %, with a ratio of 0.65 by 6.67–30 %, and with a ratio of 0.52 increased by 2.5 with 5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–10 % with the addition of 2.5 and 10–20 % waste; • the slump of the concrete mix with a water-cement ratio of 0.95 decreased by 0.83–8.33 %, with a ratio of 0.65 by 0.83–9.17 %, and with a ratio of 0.52 by 2.5–10 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
2,5 × 40		• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 1,59–14,29 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 12,7 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3–20 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 2–3,2 % при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,2–8 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 6,35–11,11% при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,59–4,76 % при добавлении 10–20 % отходов • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 1.59–14.29 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 12.7 % with the addition of 20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3–20 %, and with a ratio of 0.52 increased by 2–3.2 % when adding 2.5–5 % HDPE and decreased by 1.2–8 % when adding 10–20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 6.35–11.11 with 2.5–5 % HDPE added and decreased by 1.59–4.76 with 10–20 % waste added	

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 6, 2026
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 6, 2026

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
2,5 × 40	2,5–20	• прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3,33 % при добавлении 5 % и уменьшилась на 6,67–10 % при добавлении 2,5 и 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25 % при добавлении 5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,5–5 % при добавлении 2,5 и 20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 6,67–1,25 %, с соотношением 0,65 — на 3,33–15,83 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 8,33–16,67 % при добавлении 5–20 % отходов • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3.33 at 5 % addition and decreased by 6.67–10 at 2.5 % and 10–20 % waste additions; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 1.25 at 5–10 % recycled HDPE and decreased by 2.5–5 % at 2.5 and 20 % waste additions; • the slump of the concrete mix with a water-cement ratio of 0.95 decreased by 6.67–1.25 %, with 0.65 decreased by 3.33–15.83 %, and with 0.52 increased by 5 with 2.5 % recycled HDPE addition and decreased by 8.33–16.67 with 5–20 % waste additions	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 увеличилась на 2,47–19,14 %, с соотношением 0,4 увеличилась на 2,57–4,67 при добавлении 5–7,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,34 и 4,44 % при добавлении 2,5 и 10 % отходов соответственно; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 7,5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 2,92–49,79 % при добавлении 5–10 % отходов; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 5,77 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 9,42–27,31 % при добавлении 5–10 % отходов • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.45 increased by 2.47–19.14 %, and with a ratio of 0.4 increased by 2.57–4.67 % when adding 5–7.5 % recycled HDPE, but decreased by 2.34 and 4.44 % when adding 2.5 and 10 % waste, respectively; • the flexural strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.45 decreased by 7.5 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 2.92–49.79 % when adding 5–10 % waste; • the flexural strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.4 decreased by 5.77 with 2.5 % recycled HDPE and increased by 9.42–27.31 % when adding 5–10 % waste	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
3,75	10–34	• прочность на сжатие уменьшилась на 4,96–35,38 % • the compressive strength decreased by 4.96–35.38 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]

Табл. 3. Свойства бетона, содержащего смесь различных полимерных отходов

Table 3. Properties of concrete containing a mixture of various polymer wastes

Полимеры Polymers	Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
ПЭТ и ПЭВП PET and HDPE	3,75; 27,50	30–34 ПЭВП + 5 ПЭТ 30–34 HDPE + 5 PET	• прочность на сжатие уменьшилась на 26,32–45,13 % • compressive strength decreased by 26.32–45.13 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]
ПЭТ и ПЭ PET and PE	1 × 10	0,25–1 ПЭТ + 0,25–1 ПЭ 0.25–1 PET + 0.25–1 PE	• прочность на сжатие уменьшилась на 6,52–45,65 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 12,05 % при добавлении 0,25 % ПЭТ и 0,5 % ПЭ и уменьшилась на 13,32–38,69 % при остальных соотношениях смеси вторичных полимеров; • прочность на изгиб увеличилась на 10 % при добавлении 0,25 % ПЭТ и 0,5 % ПЭ и уменьшилась на 8–36 % при остальных соотношениях смеси вторичных полимеров • compressive strength decreased by 6.52–45.65 %; • splitting tensile strength increased by 12.05 % with the addition of 0.25 % PET and 0.5 % PE, but decreased by 13.32–38.69 % with other secondary polymer mixture ratios; • flexural strength increased by 10.00 % with the addition of 0.25 % PET and 0.5 % PE, but decreased by 8.00–36.00 % with other secondary polymer mixture ratios	S. Duraiswamy и соавт. [55] S. Duraiswamy et al. [55]
ПЭТ, ПЭВП и ПП PET, HDPE and PP	≤13,2	5–10 ПЭТ + 5–10 ПЭВП; 5–10 ПЭТ + 5–10 ПП; 5–10 ПЭВП + 5–10 ПП; 5–10 ПЭТ + 5–10 ПЭВП + + 5–10 ПП 5–10 PET + 5–10 HDPE; 5–10 PET + 5–10 PP; 5–10 HDPE + 5–10 PP; 5–10 PET + 5–10 HDPE + + 5–10 PP	• водопоглощение уменьшилось на 1,23 и 0,37 % при добавлении 5 % ПЭТ с 5 % ПЭВП и 5 % ПЭТ с 5 % ПП, в остальных случаях увеличилось на 0,98–9,69 %; • ударная вязкость увеличилась на 180–450 %; • прочность на сжатие уменьшилась на 17,95–40,29 % при добавлении 5–10 % сразу всех видов вторичных полимеров; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 16,79–37,96 % при добавлении 5–10 % сразу всех видов вторичных полимеров • water absorption decreased by 1.23 % and 0.37 % with the addition of 5 % PET + 5 % HDPE and 5 % PET + 5 % PP, respectively, but increased by 0.98–9.69 % in the other cases; • impact strength increased by 180–450 %; • compressive strength decreased by 17.95–40.29 % when 5–10 % of all types of recycled polymers were added simultaneously; • splitting tensile strength decreased by 16.79–37.96 % when 5–10 % of all types of recycled polymers were added simultaneously	M. Abu-Saleem и соавт. [56] M. Abu-Saleem et al. [56]

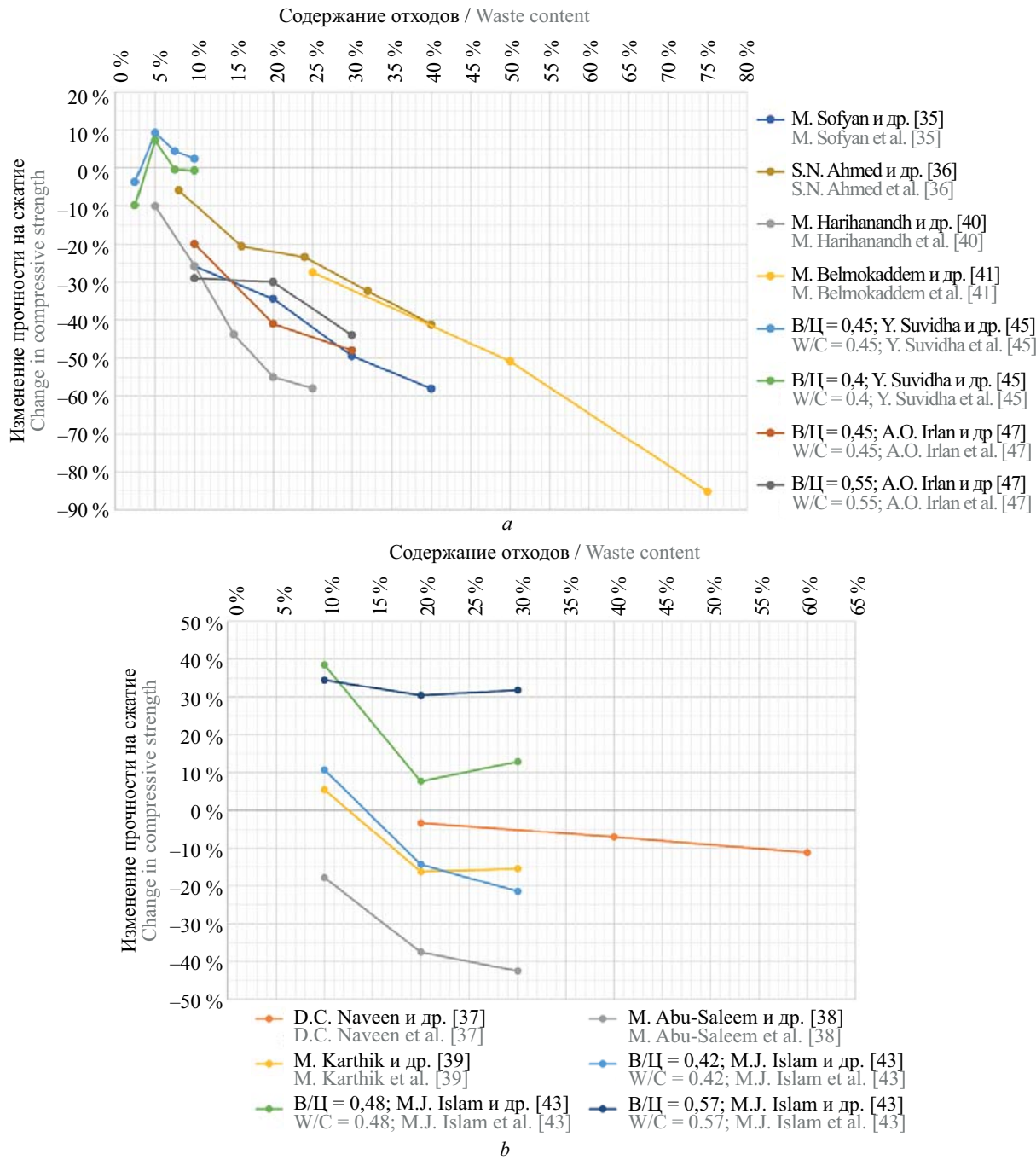


Рис. 3. Изменение прочности на сжатие с увеличением содержания ПП: *a* — в мелком заполнителе; *b* — в крупном заполнителе

Fig. 3. Changes in compressive strength with increasing PP content: *a* — in fine aggregate; *b* — in coarse aggregate

о том, что при увеличении количества вторичного ПП в бетоне прочность на сжатие в основном уменьшается. Изменение прочности при замене части мелкого заполнителя вторичным ПП происходит в диапазоне от +9,28 % при 5%-ной замене и до -85,14 % при 75%-ной замене, а при замене части крупного от +38,46 % при 10%-ной замене до -42,5 % при 30%-ной замене (рис. 3).

По графикам изменения прочностных характеристик были определены их средние значения

при различных уровнях содержания вторичного ПП в качестве крупного и мелкого заполнителя (табл. 4). В случаях снижения прочности значения изменений соответствующих показателей представлены со знаком «-».

Согласно табл. 4, практически все средние значения изменения прочности при замене вторичным ПП крупного заполнителя оказались выше аналогичных значений при замене мелкого заполнителя. При этом оптимальным процентным содержанием

Табл. 4. Средние значения изменения прочностных характеристик бетона с использованием вторичного ПП
Table 4. Mean changes in the strength properties of concrete incorporating recycled PP

Содержание ПП, % PP content, %	Среднее изменение прочности, % Average changes in strength, %						Среднее из- менение всех характери- стик, % Average changes of all character- istics, %
	на сжатие compressive strength		на растяжение при раскалывании tensile strength		на изгиб flexural strength		
	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	
5	2,2	–	–4,5	–	4,5	–	0,7
10	–20,3	14,3	–5,4	–10,3	–21,9	–14,9	–9,8
15	–30,3	4,1	–13,0	–7,1	–40,3	–20,3	–17,8
20	–36,0	–5,6	–18,6	–3,9	–50,7	–25,6	–23,4
25	–39,9	–2,6	–23,5	–10,7	–53,3	–23,3	–25,5
30	–43,1	–6,7	–16,9	–17,3	–	–20,5	–20,8
35	–42,0	–6,5	–31,5	–12,0	–	–	–23,0
40	–46,8	–7,1	–45,9	–14,2	–	–	–28,5
45	–46,0	–7,5	–	–16,5	–	–	–21,6
50	–50,9	–9,5	–	–18,5	–	–	–24,3
55	–57,5	–10,0	–	–20,5	–	–	–27,1
60	–64,5	–11,2	–	–22,7	–	–	–30,3
65	–71,5	–	–	–	–	–	–71,5
70	–78,0	–	–	–	–	–	–78,0
75	–85,1	–	–	–	–	–	–85,1

с учетом среднего изменения по всем прочностным характеристикам, указанным в табл. 4, является диапазон от 5 до 15 %. Дальнейшее увеличение количества полимерных отходов данного вида в бетоне приводит к значительному снижению его прочно-сти.

На рис. 4 представлены графики, отражающие изменение прочности на сжатие бетона, содержаще-го отходы из ПЭВП в качестве мелкого и крупного заполнителя соответственно.

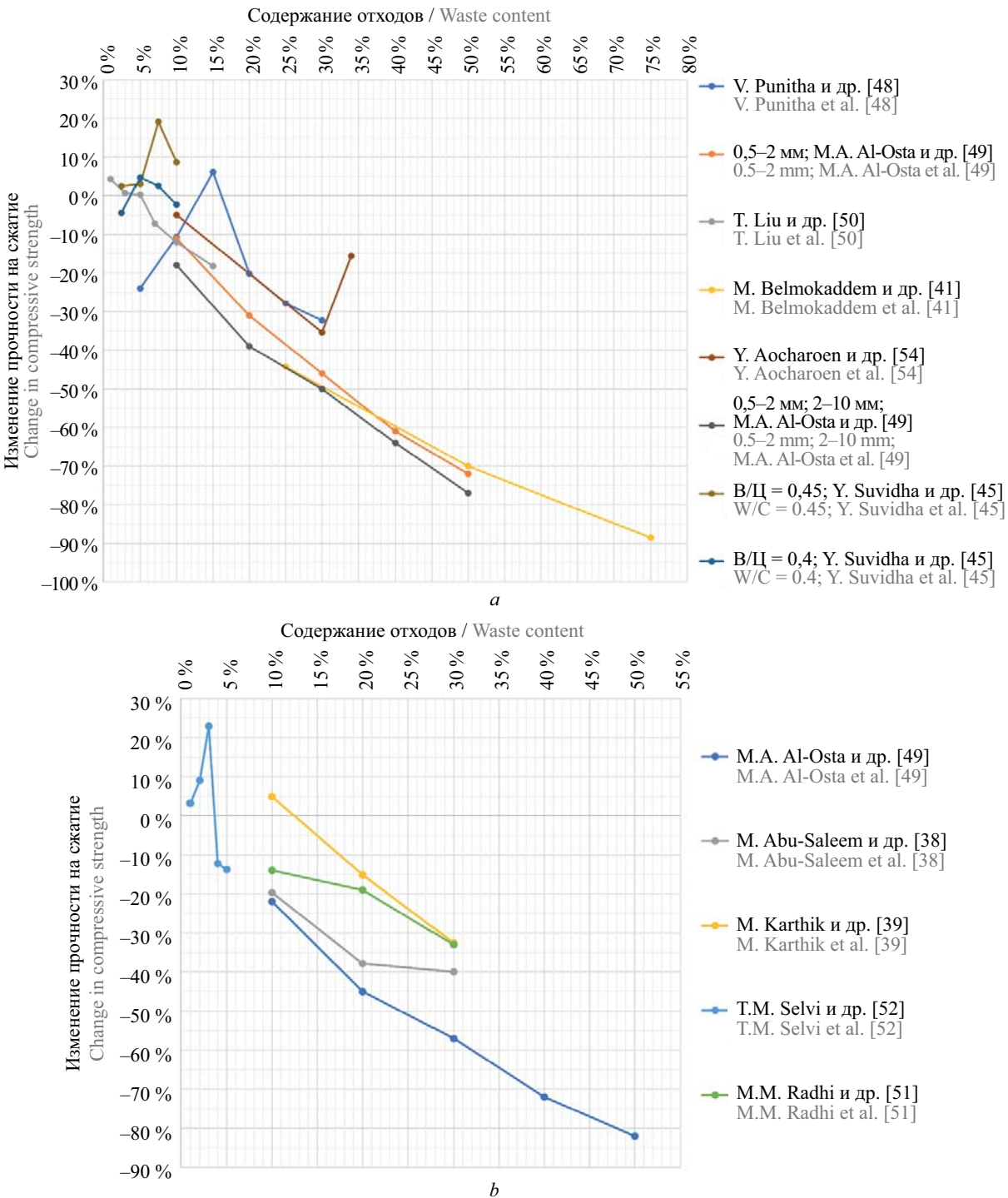
Прочность на сжатие при увеличении содер-жания отходов из ПЭВП имеет общую тенденцию к уменьшению при использовании их как в качестве крупного, так и мелкого заполнителя. Изменение этого показателя при замене части мелкого запол-нителя вторичным ПЭВП происходит в диапазоне от +19,14 % при 7,5%-ной замене и до –88,57 % при 75%-ной замене (рис. 4, а), а при замене части крупного — от +35 % при 5%-ной замене (рис. 4, с) до –82 % при 50%-ной замене (рис. 4, б).

Средние значения изменения прочностных характеристик при различных уровнях содержания вторичного ПЭВП в качестве крупного и мелкого заполнителя, определенные с помощью графиков, представлены в табл. 5. Аналогично табл. 4 уменьшение показателей обозначено знаком «-».

При замене крупного заполнителя вторичным ПЭВП большинство средних изменений показателей прочности оказались выше, чем при замене мелкого заполнителя. Оптимальным процентным содержанием, учитывая среднее изменение по всем

прочностным характеристикам, указанным в табл. 5, является диапазон от 5 до 20 %. При дальнейшем увеличении количества полимерных отходов данного вида в бетоне происходит значительное снижение его прочности.

Таким образом, добавление отходов ПП и ПЭВП как в виде мелкого, так и крупного заполнителя в большинстве случаев приводит к устойчивой тенденции снижения прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и на изгиб. Причиной этого явления может служить недостаточная адгезия меж-



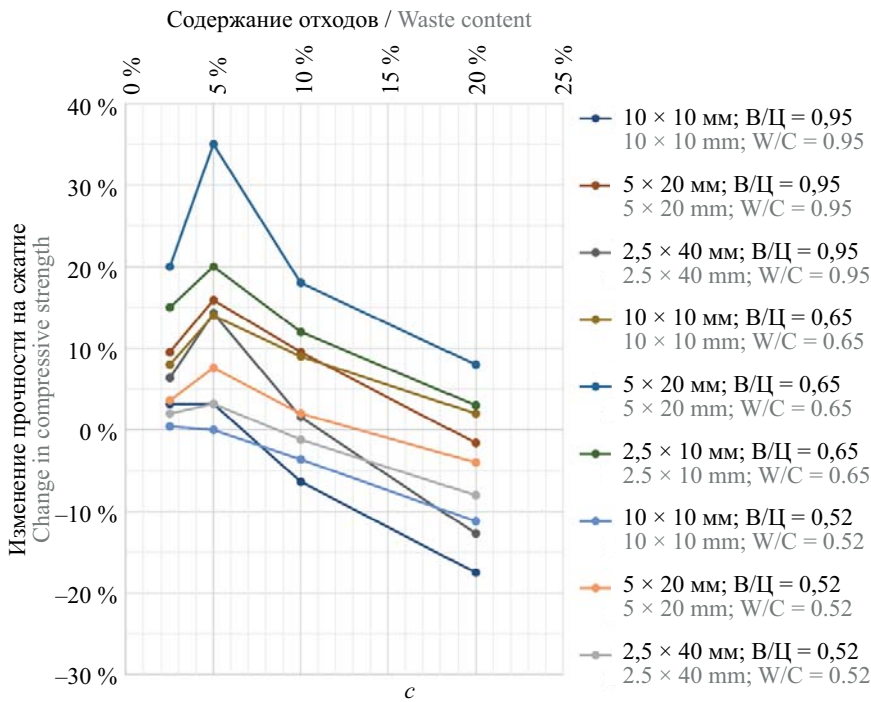


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие при увеличении содержания ПЭВП: *a* — в мелком заполнителе; *b* — в крупном заполнителе; *c* — в крупном заполнителе, по данным из исследования J.N. Tamrin [53]

Fig. 4. Changes in compressive strength with increasing HDPE content: *a* — in fine aggregate; *b* — in coarse aggregate; *c* — in coarse aggregate, based on data from J.N. Tamrin [53]

Табл. 5. Средние значения изменения прочностных характеристик бетона с использованием вторичного ПЭВП

Table 5. Mean changes in the strength properties of concrete incorporating recycled HDPE

Содержание ПЭВП, % HDPE content, %	Среднее изменение прочности, % Average changes in strength, %						Среднее изме- нение всех ха- рактеристик, % Average changes of all character- istics, %
	на сжатие compressive strength		на растяжение при раскалывании tensile strength		на изгиб flexural strength		
	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	
5	−4,0	12,5	−4,2	6,1	−2,1	−8,6	−0,1
10	−8,4	−0,7	−15,9	1,6	−2,0	3,69	−3,6
15	−14,7	−6,5	−18,8	1,6	−31,6	1,33	−11,4
20	−27,5	−12,2	−30,3	0,5	−35,0	−0,7	−17,5
25	−36,4	−35,0	−33,5	5,3	−38,4	−1,2	−23,2
30	−42,5	−40,9	−36,4	6,7	−44,1	−2,3	−26,6
35	−55,2	−64,5	—	—	—	—	−59,9
40	−61,7	−72,0	—	—	—	—	−66,9
45	−67,5	−77,0	—	—	—	—	−72,3
50	−73,0	−82	—	—	—	—	−77,5
55	−74,0	—	—	—	—	—	−74,0
60	−77,5	—	—	—	—	—	−77,5
65	−81,5	—	—	—	—	—	−81,5
70	−85,0	—	—	—	—	—	−85,0
75	−88,6	—	—	—	—	—	−88,6

ду пластиковыми заполнителями и вяжущими компонентами, а также низкая прочность, модуль упругости и жесткость вторичных материалов по сравнению с природными [20, 60, 61].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ научных публикаций, посвященных использованию пластиковых отходов в производстве бетонных изделий, свидетельствует о значительном потенциале данной тематики. Переработка и использование отходов полимеров для изготовления строительных материалов помогают уменьшить потребление природных ресурсов, а также могут снизить затраты на транспортировку и себестоимость готовой продукции. Наиболее целесообразным является рециклинг вторичных ПП и ПЭВП, так как они широко распространены и легко поддаются переработке. Добавление отходов этого вида в качестве заполнителя в состав бетонной смеси в большинстве случаев приводит к ухудшению прочностных характеристик получаемого материала при увеличении количества вторичных полимеров. Однако в отдельных случаях прочность бетона с пластиковыми отходами может превышать

показатели контрольных образцов, в которых используются природные заполнители. При этом замещение крупного заполнителя на вторичные ПП и ПЭВП оказывает более значительное влияние на повышение прочности бетона по сравнению с заменой мелких заполнителей. Сравнительный анализ средних изменений показателей прочности также продемонстрировал, что введение полимерных отходов в состав крупного заполнителя приводит к меньшему снижению прочности бетона по сравнению с их добавлением в мелкий заполнитель. Следует отметить, что при содержании вторичного ПП и ПЭВП в количестве более 20 % наблюдается существенное ухудшение прочностных характеристик композиционного материала.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод об актуальности дальнейшего изучения свойств бетона с замещением крупного заполнителя смесью отходов ПП и ПЭВП в диапазоне от 5 до 20. Ключевым аспектом является установление оптимальных пропорций вторичных полимеров, а также определение параметров технологического процесса производства данного композиционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чалов К.В., Лагушева Е.И., Луговой Ю.В., Долода В.Ю. Метод утилизации полимерных отходов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2024. № 4 (24). С. 100–106. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-100-106. EDN ARQFUU.

2. Fayshal M.A. Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management // Heliyon. 2024. Vol. 10. Issue 23. P. e40838. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40838. EDN NHHOCQ.

3. Abahussain A.A.M., Nasr F.A., Jumah A.B., Saravanan P., Siva Kumar N., Al-zharani M. et al. Toxic threats from plastic waste: human health impacts, challenges, and policy solutions // RSC Advances. 2025. Vol. 15. Issue 48. Pp. 40761–40788. DOI: 10.1039/d5ra05845g. EDN TSIVXY.

4. Qian K., Wang Lu., Teng J., Liu G. Strategies and technologies for sustainable plastic waste treatment and recycling // Environmental Functional Materials. 2025. DOI: 10.1016/j.efmat.2025.01.004. EDN XFRQSN.

5. Тансыккужина И.И. Эколого-экономические аспекты рециклинга полимерных материалов // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2025. № 4 (32). С. 90–94. EDN FXIUPE.

6. Белецкий Я.О., Сердюк А.И. Рациональные методы переработки пластиковых отходов // Вестник Донбасской национальной академии строитель-

ства и архитектуры. 2023. № 5 (163). С. 37–43. EDN WQYRBK.

7. Кооп К.В. Механический рециклинг пластиковых отходов для изготовления тротуарного покрытия в жилых массивах поселка Аршалы Акмолинской области // Экологические проблемы в колледжах и школах: опыт проведения зеленых мероприятий : сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 75–79. EDN OCZCPF.

8. Ухарцева И.Ю., Цветкова Е.А., Гольдаде В.А., Шановалов В.М. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: традиционные материалы // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2021. Т. 11. № 2. С. 60–71. EDN SQQUFC.

9. Муминова О.А., Колесникова Л.А. Способы переработки полимерных отходов // Новые материалы и технологии для устойчивого развития : мат. III Междунар. науч. конф. 2024. С. 138–140. EDN GKYNOT.

10. Салихова Э.В., Сайфулин Р.М., Мурузина Е.В. Использование вторичного полимерного сырья при производстве строительных материалов // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов : сб. мат. XVII Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 90–86. EDN ULYMVN.

11. Малютина М.С., Сергеева А.А. Современные технологии переработки полимерных отходов

и проблемы их использования // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сб. науч. ст. 2-й Всеросс. молодежной науч. конф. 2024. С. 146–149. EDN QONIQO.

12. Ланицкий С.А. Сравнительный анализ различных технологий переработки пластиковых отходов // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и обучающихся. 2024. С. 270–273. EDN DXWZMA.

13. Ухарцева И.Ю., Бобрышева С.Н., Селюков И.В. Проблемы утилизации бытовых полимерных отходов: технология и экология. Часть 1. Рециклинг и биодegradация (обзор) // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2024. № 4 (99). С. 28–42. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-4-28-42. EDN KGOSED.

14. Ишин Л.А. Экологическое содержание перспектив утилизации полимеров: реализуемые и перспективные проекты // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. 2024. Т. 17. № 4. С. 182–193. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-4-182-193. EDN ZFBJQU.

15. Виноградова Е.В., Мурзина О.Г., Тангиев А.М. Перспективы использования пластиковых отходов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2020. № 10 (70). С. 270–266. EDN ZTAADK.

16. Борович Я.П. Различные методы переработки полимерных отходов и их применение в строительстве // Наука сегодня: технические и естественные науки : сб. мат. XXXVI Междунар. очно-заочной науч.-практ. конф. 2023. С. 101–104. EDN KJTWQJ.

17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 488. P. 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151. EDN AFGJFL.

18. Magbool H.M. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete : a systematic review // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. P. e04432. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04432. EDN IWNSJU.

19. Saha S., Sau D., Hazra T. Economic viability analysis of recycling waste plastic as aggregates in green sustainable concrete // Waste Management. 2023. Vol. 169. Pp. 289–300. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.023. EDN ATRRPZ.

20. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона // Техника и технология силикатов. 2024. Т. 31. № 3. С. 247–261. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-247-261. EDN AYFQSM.

21. Jain A., Siddique S., Gupta T., Sharma R.K., Chaudhary S. Utilization of shredded waste plastic bags to improve impact and abrasion resistance of con-

crete // Environment, Development and Sustainability. 2020. Vol. 22. Issue 1. Pp. 337–362. DOI: 10.1007/s10668-018-0204-1. EDN GYOAWD.

22. Pasha M.Sh., Aslam M.F., Hamza M., Ali N.M., Jabbar I., Ahmed S., Abbasi H.K.Ja. Sustainable construction: Performance analysis of concrete incorporating E-waste plastic aggregates and silica fume // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 474. P. 141103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141103. EDN CJUYAK.

23. Attia M.M., Elsadany R.A., Khalil M.H., Ahmed M., Baktheer A., Shawky Sh.M.M. Physical and mechanical properties of concrete containing plastic tube fibers // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. e03809. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03809. EDN KMOKWF.

24. Soharu A., Naveen B.P., Vaid K. Influence of using waste plastic as coarse aggregates-based sustainable concrete // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Waste and Resource Management. 2026. Vol. 179. Issue 1. Pp. 45–54. DOI: 10.1680/jwarm.25.00017

25. Guo Y.Ch., Li X.Mi., Zhang J., Lin J.X. A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 79. P. 107787. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107787. EDN EEGPUG.

26. Баруздин А.А., Шаронов Д.И., Прохоров С.В. Рециклинг полимерных отходов // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сб. мат. III Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 206–208. EDN HBFTBD.

27. Ковалев К.Ю., Монастырский Д.И. Использование переработанного пластика бутылок в строительстве // Современные проблемы экологии и промышленной безопасности : мат. IV Всеросс. науч.-техн. конф. 2025. С. 36–38. EDN TZORGG.

28. Альобаиди Д.А., Худяков А.В. Применение пластиковых отходов в качестве мелкого заполнителя в бетоне // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2018 : мат. Всеросс. открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. 2018. С. 137–140. EDN YOJLED.

29. Hamada H.M., Al-Attar A., Abed F., Beddu S., Humada A.M., Majdi A. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material // Sustainable Materials and Technologies. 2024. Vol. 40. P. e00877. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00877. EDN ESWEUC.

30. Almohana A.I., Abdulwahid M.Ya., Galobardes I., Mushtaq Ja., Almojil S.F. Producing sustainable concrete with plastic waste : a review // Environmental Challenges. 2022. Vol. 9. P. 100626. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100626. EDN HOYMHJ.

31. Проскурнин А.М., Жужома К.И., Афанасьев А.П. Использование пластиковых отходов в качестве строительных материалов // Актуальные вопросы современной науки и инноватики : сб. науч. ст. по мат.

I Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 290–294. EDN CHBTHG.

32. Сиков Н.Е., Серёгин А.И. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8 (92). С. 259–270. EDN OKBHDS.

33. Юркин Ю.В., Сиков Н.Е. Свойства и характеристики бетона и цементных растворов, содержащих пластмассовые отходы в качестве частичного заполнителя // Анализ и синтез сложных технических и технологических систем : сб. ст. Междунар. науч. конф. 2022. С. 26–28. EDN QRYGSV.

34. Алиев З.А. Вторичное использование пластиковых отходов в производстве строительных материалов // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 8 (47). С. 38–41. EDN OJKTH.

35. Sofyan M., Parung H., Tjaronge M.W., Amiruddin Aa. Selected mechanical and physical properties concrete with polypropylene plastic Granule aggregate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1117. P. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1117/1/012014. EDN UMULMS.

36. Ahmed S.N., Hamah Sor N., Ahmed M.A., Qaidi Sh.M.A. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 57. Pp. 818–823. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.417. EDN ESRTJN.

37. Naveen D.C., Naresh K., Keerthi Gowda B.S., Reddy G.M.S., Prasad C.D., Shanmugam R. Effects of polypropylene waste addition as coarse aggregates in concrete: experimental Characterization and Statistical analysis // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022. P. 7886722. DOI: 10.1155/2022/7886722. EDN CZBWDY.

38. Abu-Saleem M., Zhuge Y., Hassanli R., Ellis M., Rahman M., Levett P. Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 293. P. 123477. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123477. EDN UYOLUR.

39. Karthik M., Ajey Kumar V.G., Keshava M. Study on behavior of concrete mixes using waste plastics as an alternative for coarse aggregates // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 822. Issue 1. P. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012011. EDN ABUUGF.

40. Harihanandh M., Karthik P. Feasibility study of recycled plastic waste as fine aggregates in concrete // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 52. Pp. 1807–1811. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.459. EDN OPRFLK.

41. Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Ya., Pekmezci B.Y. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 257.

P. 119559. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559. EDN FXXILR.

42. Park Ju.K., Kim D.J., Kim M.O. Mechanical behavior of waste fishing net fiber-reinforced cementitious composites subjected to direct tension // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. P. 101622. DOI: 10.1016/j.job.2020.101622. EDN WKIORE.

43. Islam M.J. Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 2022. P. 4928065. DOI: 10.1155/2022/4928065. EDN WJWIJG.

44. Alkraway A., Shereen Q.A., Salah Nasr M., Ali Hasan Z., Shubbar A. Improving the mechanical behavior of pervious concrete using polypropylene and waste rope fibers // Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences. 2024. Vol. 17. Issue 1. Pp. 38–46. DOI: 10.30772/qjes.2024.146598.1114. EDN CEYPBC.

45. Suvidha Y., Jain S., Kumar C.A. Studies on partial replacement of waste high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) plastic with fine aggregate (FA) on mechanical, durability and thermal properties of M30 and M40 grade concrete // Discover Civil Engineering. 2024. Vol. 1. Issue 1. P. 8. DOI: 10.1007/s44290-024-00007-9. EDN BHORWT.

46. Malek M., Jackowski M., Lasica W., Kadel M. Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 8. P. 1827. DOI: 10.3390/ma13081827. EDN BJQXFT.

47. Irlan A.O., Parung H., Tjaronge M.W., Caronge M.A. Mechanical, environmental, and cost evaluation of concrete using recycled polypropylene // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2025. Vol. 12. P. 101255. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101255. EDN WQKLTE.

48. Punitha V., Sakthieswaran N., Ganesh Babu O. Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 37. Pp. 1032–1035. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.288. EDN XRDWCZ.

49. Al-Osta M.A., Al-Tamimi A.S., Al-Tarbi S.M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Al-Awsh W.A., Saleh T.A. Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: mechanical and thermal properties // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103399. DOI: 10.1016/j.job.2021.103399. EDN EAPHXU.

50. Liu T., Nafees A., Khan Sh., Javed M.F., Aslam F., Alabduljabbar H. et al. Comparative study of mechanical properties between irradiated and regular plastic waste as a replacement of cement and fine aggregate for manufacturing of green concrete // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. Issue 2. P. 101563. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.006. EDN ZQIOEL.

51. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete beams

containing HDPE plastic waste as coarse aggregate // Cogent Engineering. 2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470. EDN HVVUJA.

52. *Tamil Selvi M., Dasarathy A.K., Ponkumar Ilango S.* Mechanical properties on light weight aggregate concrete using high density polyethylene granule // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 81. Pp. 926–930. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.302. EDN OAUNKT.

53. *Tamrin, Nurdiana Ju.* The effect of recycled HDPE plastic additions on concrete performance // Recycling. 2021. Vol. 6. Issue 1. P. 18. DOI: 10.3390/recycling6010018. EDN IDYGGL.

54. *Aocharoen Ya., Chotickai P.* Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates // Cleaner Engineering and Technology. 2023. Vol. 12. P. 100600. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100600. EDN UHJXLO.

55. *Duraiswamy S., Neelamegam P., VishnuPriyan M., Alaneme G.U.* Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Issue 1. P. 27221. DOI: 10.1038/s41598-024-78107-w. EDN MXOSZX.

56. *Abu-Saleem M., Zhuge Ya., Hassanli R., Ellis M., Rahman Md.M., Levett P.* Impact Resistance and sodium sulphate attack testing of concrete incorporating mixed types of recycled plastic waste // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 17. P. 9521. DOI: 10.3390/su13179521. EDN KELAMD.

57. *Tudu Ch., Mohanty M., Mohapatra S.S., Nayak S.* A systematic review exploring the feasibility of waste plastic as different constituents towards sustainable concrete // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 428. P. 136210. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136210. EDN NKTIYG.

58. *Musa A.E.S., Ahmed A., Ahmad S., Mohamed Kh., Al-Fakih A., Al-Osta M.A.* Properties of concrete incorporating plastic wastes and its applications : a comprehensive review // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 101. P. 111843. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.111843. EDN VXAJCE.

59. *Almeshal I., Tayeh B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mustafa Mohamed A., Alaskar A.* Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites : a review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 253. P. 119146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146. EDN DJKJNQ.

60. *Abbas S.N., Qureshi M.I.* Effect of recycled plastic aggregates on mechanical and durability properties of concrete : a review // Materials Chemistry and Physics: Sustainability and Energy. 2025. Vol. 3. P. 100016. DOI: 10.1016/j.macse.2025.100016. EDN WBILND.

61. *Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A.* Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste : a review // Waste Management. 2020. Vol. 113. Pp. 157–175. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.048. EDN LYAGZQ.

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 18 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анастасия Александровна Павловская** — студент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б; РИНЦ ID: 944534, ResearcherID: ADB-2524-2022, ORCID: 0000-0002-2423-1159; pavlovskaya.aa@gmail.com;

Анастасия Олеговна Носова — кандидат технических наук, ассистент, центр химической инженерии; **Национальный исследовательский университет ИТМО**; 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А; РИНЦ ID: 893035, Scopus: 58828871600, ResearcherID: NRY-9881-2025, ORCID: 0009-0009-2014-5876; aonosova@itmo.ru;

Майя Валерьевна Успенская — доктор технических наук, профессор, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б; профессор, Институт химии; **Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)**; 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9; РИНЦ ID: 176108, Scopus: 6602189454, ResearcherID: E-1095-2014, ORCID: 0000-0003-2510-2639; uspenskaya_mv@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Павловская А.А. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Носова А.О. — научное редактирование текста.

Успенская М.В. — идея, написание статьи, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chalov K.V., Laguseva E.I., Lugovoy Yu.V., Doluda V.Yu. Method of polymer waste disposal. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Building. Electrical engineering and chemical technology"*. 2024; 4(24): 100-106. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-100-106. EDN ARQFUU. (rus.).
2. Fayshal M.A. Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*. 2024; 10(23):e40838. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40838. EDN NHHOCQ.
3. Abahussain A.A.M., Nasr F.A., Jumah A.B., Saravanan P., Siva Kumar N., Al-zharani M. et al. Toxic threats from plastic waste: human health impacts, challenges, and policy solutions. *RSC Advances*. 2025; 15(48):40761-40788. DOI: 10.1039/d5ra05845g. EDN TSIVXY.
4. Qian K., Wang Lu., Teng J., Liu G. Strategies and technologies for sustainable plastic waste treatment and recycling. *Environmental Functional Materials*. 2025. DOI: 10.1016/j.efmat.2025.01.004. EDN XFRQSN.
5. Tansykkuzhina I.I. Environmental and economic aspects of recycling polymeric materials. *Bulletin of the Young Scientist of UGNTU*. 2025; 4(32):90-94. EDN FXIUPE. (rus.).
6. Beletsky Ya., Serdyuk A. Rational methods for recycling plastic waste. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023; 5(163):37-43. EDN WQYRBK. (rus.).
7. Koop K.V. Mechanical recycling of plastic waste for the production of paving stones in residential areas of the village of Arshaly, Akmola Region. *Environmental Issues in Colleges and Schools: Experience in Conducting Green Events : Collection of Materials from the International Scientific and Practical Conference*. 2023; 75-79. EDN OCZCPF. (rus.).
8. Ukhartseva I.Yu., Tsvetkova E.A., Goldade V.A., Shapovalov V.M. Utilization of polymer packaging materials as a basis of environmental safety: traditional materials. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*. 2021; 11(2):60-71. EDN SQQUFC. (rus.).
9. Muminova O.A., Kolesnikova L.A. Methods of processing polymer waste. *New materials and technologies for sustainable development : Proceedings of the III International Scientific Conference*. 2024; 138-140. EDN GKYPHOT. (rus.).
10. Salikhova E.V., Sayfullin R.M., Muruzina E.V. Use of secondary polymer raw materials in the production of building materials. *Development of modern science and technologies in the context of transformational processes : collection of materials of the XVII International scientific and practical conference*. 2023; 90-86. EDN ULYMVN. (rus.).
11. Malyutina M.S., Sergeeva A.A. Modern polymer waste recycling technologies and problems with their use. *The future of science: the view of young scientists on the innovative development of society : collection of scientific articles of the 2nd Russian youth scientific conference*. 2024; 146-149. EDN QONIQO. (rus.).
12. Lapitskiy S.A. Comparative analysis of various technologies for processing plastic waste. *Intellectual potential of young scientists as a driver of agricultural development : proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and students*. 2024; 270-273. EDN DXWZMA. (rus.).
13. Uhartseva I.Yu., Bobrysheva S.N., Seliukov I.V. Problems of household polymer waste disposal: technology and ecology. Part 1. Recycling and biodegradation (review). *Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2024; 4(99):28-42. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-4-28-42. EDN KGOSED. (rus.).
14. Ishin L.A. Ecological content of polymer recycling prospects: ongoing and promising projects. *Bulletin of the South Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-economic Sciences*. 2024; 17(4):182-193. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-4-182-193. EDN ZFBJQU. (rus.).
15. Vinogradova E.V., Murzina O.G., Tangiev A.M. Prospects for the use of plastic waste in construction. *Engineering journal of Don*. 2020; 10(70):270-266. EDN ZTAADK. (rus.).
16. Borevich Ya.P. Various methods of processing polymer waste and their application in construction. *Science Today: technical and natural sciences : Collection of materials of the XXXVI International part-time scientific and practical conference*. 2023; 101-104. EDN KJTWQJ. (rus.).
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488:142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151. EDN AFGJFL.
18. Magbool H.M. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete : a systematic review. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22:e04432. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04432. EDN IWNSJU.
19. Saha S., Sau D., Hazra T. Economic viability analysis of recycling waste plastic as aggregates in green sustainable concrete. *Waste Management*. 2023; 169:289-300. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.023. EDN ATRRPZ.
20. Baruzdin A., Zakrevskaya L. Prospects for the use of polymer waste as concrete aggregates. *Technique and Technology of Silicates*. 2024; 31(3): 247-261. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-247-261. EDN AYPQSM. (rus.).
21. Jain A., Siddique S., Gupta T., Sharma R.K., Chaudhary S. Utilization of shredded waste plastic bags

to improve impact and abrasion resistance of concrete. *Environment, Development and Sustainability*. 2020; 22(1):337-362. DOI: 10.1007/s10668-018-0204-1. EDN GYOAWD.

22. Pasha M.Sh., Aslam M.F., Hamza M., Ali N.M., Jabbar I., Ahmed S., Abbasi H.K.Ja. Sustainable construction: Performance analysis of concrete incorporating E-waste plastic aggregates and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2025; 474:141103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141103. EDN CJUYAK.

23. Attia M.M., Elsadany R.A., Khalil M.H., Ahmed M., Baktheer A., Shawkya Sh.M.M. Physical and mechanical properties of concrete containing plastic tube fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21:e03809. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03809. EDN KMOKWF.

24. Soharu A., Naveen B.P., Vaid K. Influence of using waste plastic as coarse aggregates-based sustainable concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*. 2026; 179(1):45-54. DOI: 10.1680/jwarm.25.00017

25. Guo Y.Ch., Li X.Mi., Zhang J., Lin J.X. A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 79:107787. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107787. EDN EEGPUG.

26. Baruzdin A.A., Sharonov D.I., Prokhorov S.V. Recycling of polymer waste. *Quality of life: architecture, construction, transport, education : collection of materials of the III International scientific and practical conference*. 2025; 206-208. EDN HBFTBD. (rus.).

27. Kovalev K.Yu., Monastyrskiy D.I. Use of recycled plastic bottles in construction. *Modern problems of ecology and industrial safety : materials of the IV Russian scientific and technical conference*. 2025; 36-38. EDN TZORGG. (rus.).

28. Al'obaidi D.A., Khudyakov A.V. Application of plastic waste as a fine aggregate in concrete. *Looking at the problems of young regional economy – 2018 : proceedings of the Russian open competition of university students and young researchers*. 2018; 137-140. EDN YOJLED. (rus.).

29. Hamada H.M., Al-Attar A., Abed F., Beddu S., Humada A.M., Majdi A. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 40:e00877. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00877. EDN ESWEUC.

30. Almohana A.I., Abdulwahid M.Ya., Galobardes I., Mushtaq Ja., Almojil S.F. Producing sustainable concrete with plastic waste : a review. *Environmental Challenges*. 2022; 9:100626. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100626. EDN HOYMHJ.

31. Proskurnin A.M., Zhuzhoma K.I., Afanas'yev A.P. The use of plastic waste as building materials. *Actual issues of modern science and innovation : collection of scientific articles based on the materials of the I Interna-*

tional scientific and practical conference. 2023; 290-294. EDN CHBTHG. (rus.).

32. Sikov N.E., Seryogin A.I. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation. *Engineering journal of Don*. 2022; 8(92):259-270. EDN OKBHDS. (rus.).

33. Yurkin Yu.V., Sikov N.E. Properties and characteristics of concrete and cement mortars containing waste plastics as partial aggregate. *Analysis and synthesis of complex technical and technological systems : collection of articles from the international scientific conference*. 2022; 26-28. EDN QRYGSV. (rus.).

34. Aliev Z.A. Recycling of plastic waste in the production of building materials. *Alley Science*. 2020; 1(8):(47): 38-41. EDN OJKTIJ. (rus.).

35. Sofyan M., Parung H., Tjaronge M.W., Amiruddin Aa. Selected mechanical and physical properties concrete with polypropylene plastic Granule aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1117:012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1117/1/012014. EDN UMULMS.

36. Ahmed S.N., Hamah Sor N., Ahmed M.A., Qaidi Sh.M.A. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 57:818-823. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.417. EDN ESRTJN.

37. Naveen D.C., Naresh K., Keerthi Gowda B.S., Reddy G.M.S., Prasad C.D., Shanmugam R. Effects of polypropylene waste addition as coarse aggregates in concrete: experimental Characterization and Statistical analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022; 2022:7886722. DOI: 10.1155/2022/7886722. EDN CZBWDY.

38. Abu-Saleem M., Zhuge Y., Hassanli R., Ellis M., Rahman M., Levett P. Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application. *Construction and Building Materials*. 2021; 293:123477. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123477. EDN UYOLUR.

39. Karthik M., Ajey Kumar V.G., Keshava M. Study on behavior of concrete mixes using waste plastics as an alternative for coarse aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 822(1):012011. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012011. EDN ABUUGF.

40. Harihanandh M., Karthik P. Feasibility study of recycled plastic waste as fine aggregates in concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 52:1807-1811. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.459. EDN OPRFLK

41. Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Ya., Pekmezci B.Y. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119559. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559. EDN FXXILR.

42. Park Ju.K., Kim D.J., Kim M.O. Mechanical behavior of waste fishing net fiber-reinforced cementitious composites subjected to direct tension. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101622. DOI: 10.1016/j.job.2020.101622. EDN WKIORE.
43. Islam M.J. Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022:4928065. DOI: 10.1155/2022/4928065. EDN WJWIJG.
44. Alkraway A., Shereen Q.A., Salah Nasr M., Ali Hasan Z., Shubbar A. Improving the mechanical behavior of pervious concrete using polypropylene and waste rope fibers. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*. 2024; 17(1):38-46. DOI: 10.30772/qjes.2024.146598.1114. EDN CEYPBC.
45. Suvidha Y., Jain S., Kumar C.A. Studies on partial replacement of waste high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) plastic with fine aggregate (FA) on mechanical, durability and thermal properties of M30 and M40 grade concrete. *Discover Civil Engineering*. 2024; 1(1):8. DOI: 10.1007/s44290-024-00007-9. EDN BHORWT.
46. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M. Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement. *Materials*. 2020; 13(8):1827. DOI: 10.3390/ma13081827. EDN BJQXFT.
47. Irlan A.O., Parung H., Tjaronge M.W., Caronge M.A. Mechanical, environmental, and cost evaluation of concrete using recycled polypropylene. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 12:101255. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101255. EDN WQKLTE.
48. Punitha V., Sakthieswaran N., Ganesh Babu O. Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 37:1032-1035. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.288. EDN XRDWCZ.
49. Al-Osta M.A., Al-Tamimi A.S., Al-Tarbi S.M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Al-Awsh W.A., Saleh T.A. Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: mechanical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103399. DOI: 10.1016/j.job.2021.103399. EDN EAPHXU.
50. Liu T., Nafees A., Khan Sh., Javed M.F., Aslam F., Alabduljabbar H. et al. Comparative study of mechanical properties between irradiated and regular plastic waste as a replacement of cement and fine aggregate for manufacturing of green concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022; 13(2):101563. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.006. EDN ZQIOEL.
51. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete beams containing HDPE plastic waste as coarse aggregate. *Cogent Engineering*. 2022; 9(1). DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470. EDN HVVUJA.
52. Tamil Selvi M., Dasarathy A.K., Ponkumar Ilango S. Mechanical properties on light weight aggregate concrete using high density polyethylene granule. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 81:926-930. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.302. EDN OAUNKT.
53. Tamrin, Nurdiana Ju. The effect of recycled HDPE plastic additions on concrete performance. *Recycling*. 2021; 6(1):18. DOI: 10.3390/recycling6010018. EDN IDYGGL.
54. Aocharoen Ya., Chotickai P. Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023; 12:100600. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100600. EDN UHJXLO.
55. Duraiswamy S., Neelamegam P., VishnuPriyan M., Alaneme G.U. Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete. *Scientific Reports*. 2024; 14(1):27221. DOI: 10.1038/s41598-024-78107-w. EDN MXOSZX.
56. Abu-Saleem M., Zhuge Ya., Hassanli R., Ellis M., Rahman Md.M., Levett P. Impact Resistance and sodium sulphate attack testing of concrete incorporating mixed types of recycled plastic waste. *Sustainability*. 2021; 13(17):9521. DOI: 10.3390/su13179521. EDN KELAMD.
57. Tudu Ch., Mohanty M., Mohapatra S.S., Nayak S. A systematic review exploring the feasibility of waste plastic as different constituents towards sustainable concrete. *Construction and Building Materials*. 2024; 428:136210. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136210. EDN NKTIYG.
58. Musa A.E.S., Ahmed A., Ahmad S., Mohamed Kh., Al-Fakih A., Al-Osta M.A. Properties of concrete incorporating plastic wastes and its applications : a comprehensive review. *Journal of Building Engineering*. 2025; 101:111843. DOI: 10.1016/j.job.2025.111843. EDN VXAJCE.
59. Almeshal I., Tayeh B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mustafa Mohamed A., Alaskar A. Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites : a review. *Construction and Building Materials*. 2020; 253:119146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146. EDN DJKJNQ.
60. Abbas S.N., Qureshi M.I. Effect of recycled plastic aggregates on mechanical and durability properties of concrete : a review. *Materials Chemistry and Physics: Sustainability and Energy*. 2025; 3:100016. DOI: 10.1016/j.mace.2025.100016. EDN WBILND.
61. Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste : a review. *Waste Management*. 2020; 113:157-175. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.048. EDN LYAGZQ.

Received November 14, 2025.

Adopted in revised form on March 17, 2026.

Approved for publication on March 18, 2026.

B I O N O T E S: **Anastasiya A. Pavlovskaya** — student, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 letter B Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 944534, ResearcherID: ADB-2524-2022, ORCID: 0000-0002-2423-1159; pavlovskaya.aa@gmail.com;

Anastasiia O. Nosova — Candidate of Technical Sciences, Assistant, Chemical Engineering Center; **ITMO University**; 49 letter A Kronverkskiy av., Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; ID RSCI: 893035, Scopus: 58828871600, ResearcherID: NRY-9881-2025, ORCID: 0009-0009-2014-5876; aonosova@itmo.ru;

Mayya V. Uspenskaya — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 letter B Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; Professor, Institute of Chemistry; **Saint Petersburg State University (SPbSU)**; 7–9 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation; ID RSCI: 176108, Scopus: 6602189454, ResearcherID: E-1095-2014, ORCID: 0000-0003-2510-2639; uspenskaya_mv@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Anastasiya A. Pavlovskaya — collection of material, processing of material, manuscript writing.

Anastasiia O. Nosova — scientific editing of text.

Mayya V. Uspenskaya — idea, manuscript writing, scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.