

Научная статья

УДК 69.059.643

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>

CC BY 4.0

## Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона

Анна Викторовна Гранева<sup>1\*</sup> , Кирилл Игоревич Лушин<sup>2</sup> , Иван Сергеевич Пуляев<sup>2</sup> ,  
Виктория Давидтбеговна Кудрявцева<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>3</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: a121269@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе сноса и демонтажа аварийных зданий, а также при строительстве и реконструкции ежегодно в России образуется более 70 млн. тонн строительных отходов. В основе экономики замкнутого цикла лежит принцип возобновления ресурсов, переработки вторичного сырья, технологических мероприятий по возвращению отходов в повторный хозяйственный оборот. В настоящее время проблема экономии природных ресурсов, уменьшения отходов строительного производства особенно актуальны. Около 80% строительных отходов составляет тяжелый и легкий железобетон, из которого может производиться вторичный щебень, увеличение объемов использования которого является одной из задач при переходе линейной экономики на экономику замкнутого цикла. **Материалы и методы.** Проведено изучение вопроса реализации комплекса организационных, экономических и технологических решений, целью которых является повторное использование отходов строительства. Анализ проводился на примере использования вторичных заполнителей, полученных из бетонного лома. **Результаты и обсуждения.** В ходе исследований доказана необходимость вовлечения бетонного лома в повторный хозяйственный оборот, так как использование его в строительстве в полной мере отвечает требованиям поставленных задач в области энерго- и ресурсосбережения и экологической безопасности. **Выводы.** Вторичный щебень представляет собой ценный ресурс, способствующий устойчивому развитию экономики в целом и сокращению вредного воздействия строительной индустрии на экологию.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рециклинг, экономика замкнутого цикла, переработка лома из бетона и железобетона, вторичный щебень, отходы строительного производства.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гранева А.В., Лушин К.И., Пуляев И.С., Кудрявцева В.Д. Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>. – EDN: RJESBT.

### ВВЕДЕНИЕ

С развитием промышленного производства, увеличением темпов и объемов возведения зданий и сооружений из года в год уменьшается уровень природных ресурсов, усложняется процесс их добычи. При увеличении уровня потребления населения растет необходимость в возведении жилых зданий, удовлетворяющих экологическим, теплофизическим, эстетическим нормам и требованиям граждан к современному жилью. Для обновления жилищного

фонда разрабатываются и реализуются программы реновации жилья, что ведет непременно к сносу аварийного, а также морально устаревшего жилищного фонда. Вопрос использования железобетонного лома также актуален и в связи со сносом разрушенных зданий в результате военных действий. Не только в процессе сноса и демонтажа зданий, но и при строительстве, реконструкции, благоустройстве ежегодно в России образуется более 70 млн тонн строительных отходов, из которых на переработку отправляется менее 25% объема. Поскольку большинство строи-

© Гранева А.В., Лушин К.И., Пуляев И.С., Кудрявцева В.Д., 2024

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

тельных элементов изготавливаются способами, не позволяющими демонтировать их в конце срока службы, они в основном утилизируются на свалках или сжигаются [1]. В лучшем случае оставшиеся отходы отправляются на свалки, что негативно влияет на экологическое состояние природной среды и приводит к нерациональной трате сырьевых запасов. Из-за низкого уровня контроля за образованием, транспортировкой и размещением строительного мусора нерадивые организации допускают стихийные навалы мусора в лесах, возле дорог, на территориях в особо охраняемых природных объектах. Кроме того, строительство зданий и сооружений приводит к значительным выбросам парниковых газов как непосредственно на стройплощадках, так и во время производства строительных материалов, таких как цемент и бетон. Таким образом, строительная индустрия воспринимается как одна из крупнейших отраслей в мире, оказывающая значительное влияние на глобальную окружающую среду, экономику и общество с точки зрения устойчивого развития [2]. Чтобы уменьшить вредное влияние на окружающую среду, применяются различные методы: повышение энергоэффективности зданий, минимизация отходов на стройплощадках, создание строительных материалов, требующих меньше энергозатрат в производстве и с возможностью переработки или безопасной утилизации после использования, а также совершенствование систем управления отходами на строительных площадках.

**НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Линейная экономика в строительстве предполагает использование природных ресурсов для производства материалов, изделий и конструкций с последующим захоронением отходов после сноса или демонтажа зданий. Бетон, являясь в настоящее время основным строительным материалом, потребляет большое количество невозобновляемых природных ресурсов. Было выявлено, что на одного человека приходится 2,5 тонны бетона, что соответствует 17,5 миллиардов тонн в год на все население планеты, для производства которого требуется 2,62 миллиарда тонн цемента, 1,75 миллиарда тонн воды и 13,12 миллиарда тонн заполнителя [3]. Экономика замкнутого цикла (или рециклинг) – это экономика, в основе которой, в отличие от линейной, лежит принцип возобновления природных ресурсов путем переработки вторсырья, использования возобновляемых источников энергии, повторного применения отходов путем восстановления и переработки [4].

С научной точки зрения «рециклинг» – это система организационно-экономических и технологических мероприятий по возвращению отходов производства и потребления в повторный хозяйственный оборот [5].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 года № 868-р утверждена Стратегия развития промышленности строитель-



Рис. 1. Отличие линейной экономики и экономики замкнутого цикла на примере переработки лома бетона и железобетона

ных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года, которая предполагает стимулирование развития рынка вторичных материальных ресурсов техногенного происхождения и активизации процесса создания на предприятиях попутных производств по переработке отходов в готовую продукцию. Планом мероприятий, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 апреля 2017 года № 630-р в развитие указанной стратегии, в части использования вторичных ресурсов, предполагается проведение анализа технологий производства строительных материалов и изделий [4].

Все больше регионов Российской Федерации запускают новые правила утилизации строительных отходов. Например, в Московском регионе создана система, в которой отражается вся информация о компаниях, перевозящих строительные отходы, что позволяет исключать несанкционированный вывоз отходов [6].

По инициативе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации издан Федеральный закон от 14.07.2022 № 268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», в рамках которого будет регулироваться вовлечение отходов, в том числе и от строительного производства, во вторичный оборот. В 2024 году запланирована разработка реестра материалов и изделий, в производстве которых должны будут использоваться вторичные ресурсы, в перспективе после 2030 года захоронение вторичных ресурсов будет под запретом.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Все проведенные и планируемые мероприятия по использованию замкнутого цикла при утилизации строительных отходов ведут к развитию соответствующих технологий.

Образующиеся строительные отходы состоят из лома бетона, железобетона, кирпича, полимерных материалов, битума, асфальта, древесных отходов. Около 80% отходов составляет тяжелый и легкий железобетон (примерно в соотношении 4:1). Крупный лом бетона и железобетона предварительно разрушают, удаляют мусор, промывают, сортируют на фракции: 5-20, 20-40, 40-70.

Выбор метода обработки обломков бетона определяется рядом условий, таких как возможность подъезда к зоне переработки отходов, организации места для складирования оборудования и материалов и т.п. Существуют три основные схемы организации производства по переработке бетонных и железобетонных изделий:

1 схема – установка технологического оборудования на месте разборки (сноса) зданий и сооружений и получение заполнителя с последующим его транспортированием на бетонный завод или объект;

2 схема – организация производства по переработке бетонного лома в щебень, изготовлению бетонной смеси на месте сноса объектов капитального строительства;

3 схема – перемещение обломков бетона на предприятие по производству щебня [7].

Таблица 1

Сравнение характеристик вторичного и гранитного щебня фракции 5-20

№ п.п.	Наименование характеристик	Результаты испытаний	
		Вторичный щебень	Гранитный щебень
1	Доля пылевидных и глинистых включений	0,11	0,65
2	Доля зерен пластинчатой и игольчатой форм	6,7	7,5
3	Прочность (дробимость)	18,9% (марка 600)	4,1% (марка 1400)
4	Морозостойкость	F25–F50	> F150
5	Органические примеси	–	–
6	Истинная плотность щебня, кг/м <sup>3</sup>	2685	2718
7	Пористость, %	51,1	47,5
8	Средняя насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1219	1344
9	Водопоглощение, %	6,22	0,57

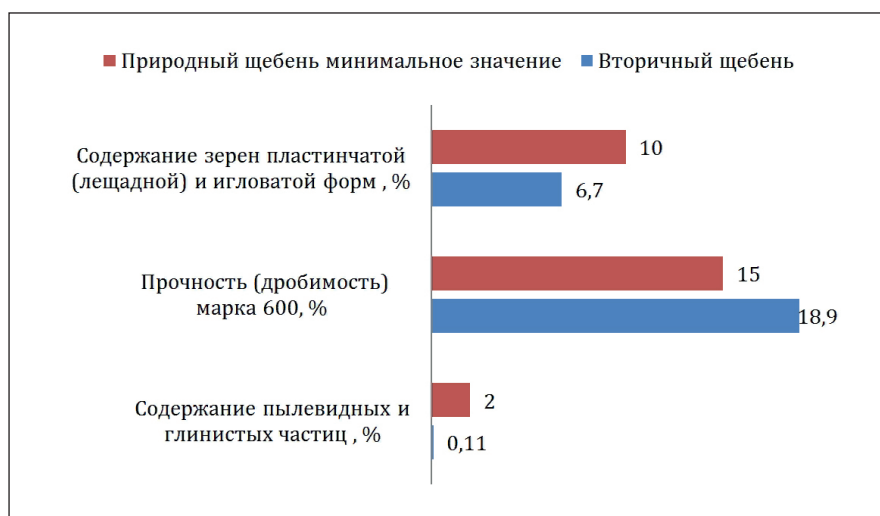


Рис. 2. Соответствие характеристик вторичного щебня требованиям ГОСТ 8267-93

Так называемый вторичный щебень используется как для устройства полов в нежилых зданиях, дорог с небольшой интенсивностью движения, автостоянок в качестве дренажа, в составе железнодорожных насыпей, так и для подсыпки дорожек, сооружения малых архитектурных форм, как средство борьбы с гололедом (отсев, бетонный или кирпичный лом самой мелкой фракции (до 10 мм) [8, 9].

Вторичный щебень по основным показателям соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4)» [10] (рис. 2).

При сносе четырехподъездного жилого дома сносимой серии получается около 5,5 тыс. кубометров обломков бетонных плит или блоков. В ходе программы реновации должно будет образоваться дополнительно не менее 30 млн. кубометров строительных отходов [11]. Только в 2022–2023 годах снесено 300 домов. Для изготовления 1 м<sup>3</sup> бетона класса В25 с применением вторичного щебня требуется 960–1010 кг вторичного щебня фракции 5–20 мм [12].

К преимуществам использования вторичного щебня можно отнести следующие факторы:

- переработка строительных отходов в щебень помогает уменьшить объем отходов, отправляемых на свалки;
- использование переработанных материалов сокращает необходимость в добыче нового природного сырья;
- экономическая выгода при применении вторичного щебня в местах его производства играет важную роль в настоящей экономической ситуации;
- уменьшение выбросов углерода позволяет снизить нагрузку на окружающую среду.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ БЕТОНА НА ВТОРИЧНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

При выполнении экспериментальных исследований основных свойств бетона с вторичным заполнителем были использованы сырьевые материалы: цемент, песок для строительных работ, рециклинговый заполнитель, зола, химические добавки.

В качестве вяжущего использовался цемент класса ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 30515-2013. Основные характеристики цемента приведены в табл. 2.

Все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 31108 – 2016, ГОСТ 30515 – 2013.

В качестве мелкого заполнителя применялся природный кварцевый песок (табл. 3).

Все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 8736-93.

При переработке бетонного лома на дробильно-сортировочном комплексе «Сатори» в городе Москве был получен отсев фракцией 5–10 мм, который использовался в качестве крупного заполнителя. Химический минералогический составы бетонного лома приведены в табл. 4 и 5.

С целью изучения физико-механических характеристик, отражающих структурные свойства, формовали образцы литьевым способом. Твердение бетонных образцов осуществлялось при нормальной температуре и влажности. Предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение определяли по стандартным методикам как среднее из шести образцов результатов испытания.

В составах 1 и 2 в качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень, в составах 3 и 4 природный заполнитель был заменен на вторичный из бетонного лома.



Таблица 2

Основные показатели цемента ЦЕМ I 42,5Н [13]

Наименование показателей	Ед. измерения	Фактические показатели
<b>Гранулометрический состав</b>		
Максимальный размер частиц d (0,9)	мкм	84,423
Минимальный размер частиц d (0,1)	мкм	6,572
Средний размер частиц d (0,5)	мкм	31,984
Средний арифметический диаметр: D (1,0)	мкм	0,67
Средний объемный диаметр: D (4,3)	мкм	39,74
Средний поверхностный диаметр: D (3,2)	мкм	11,22
<b>Физические показатели</b>		
Нормальная плотность цементного теста	%	30
Начало схватывания	ч/мин	2 ч 30 мин
Конец схватывания	ч/мин	4,5 ч
Расплав конуса (при В/Ц = 0,4)	мм	110
Тонкость помола по остатку на сите (№ 008)	%	88
<b>Предел прочности</b>		
При сжатии (28 суток)	МПа	55,6
При изгибе (28 суток)	МПа	8,5

Таблица 3

Основные показатели песка Красногорского песчаного карьера [13]

Наименование показателей	Ед. измерения	Фактические показатели
Зерновой состав	Полные остатки, %	
2,5		1,4
1,25		2,8
0,63		16,8
0,315		65,8
0,14		94,2
< 0,14		100
Модуль крупности		1,7
Содержание глины в комках	%	нет
Насыпная плотность	г/м <sup>3</sup>	1578
Истинная плотность	г/м <sup>3</sup>	2632
Пылевидные и глинистые частицы	%	1,1
Пустотность	%	44

Образцы бетона испытывались на сжатие в возрасте 28 суток. Образцы на вторичном заполнителе показали прочность 38,25 и 39,2 МПа, что соответствует классу бетона В30 (рис. 3).

Несмотря на то что свойства вторичного щебня отличаются от свойств природного щебня, производство бетонных и железобетонных изделий из рециклингового бетонного лома в полной мере отвечает требованиям поставленных задач в области энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности объектов капитального строительства.

### ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЕРЕРАБОТКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Современные исследования в области переработки строительных отходов фокусируются на разработке инновационных технологий, направленных на повышение эффективности и экологичности процессов.

Одним из перспективных направлений является использование нанотехнологий для улучшения свойств строительных материалов. В качестве добавок могут использоваться различные типы наночастиц, включая наносиликаты, наноглины, карбонатные нанотрубки и наноксиды металлов. Каждый из этих типов вносит свой вклад в улучшение определенных свойств бетона. Например, введение нанокремнезема в бетонную смесь позволяет получить бетоны с более плотной структурой и повышенными механическими свойствами [14, 15], что может компенсировать некоторое ухудшение прочностных показателей из-за применения вторичного заполнителя.

Другим направлением можно считать разработку методов глубокой очистки отходов от загрязнителей,

Таблица 4  
Минералогический состав бетонного лома

Содержание, %							
SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub> ·MgCO <sub>3</sub>	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> S	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> ·26H <sub>2</sub> O
Кремнезем	Кальцит	Портландит	Доломит	Микроклин	Альбит	Трехкальциевый силикат	Этtringит
61	16	0,9	3	6,0	10,8	1,9	0,4

Таблица 5  
Химический состав бетонного лома

Оксид	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	53,29
CaO	31,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,01
MgO	2,23
K <sub>2</sub> O	1,42
SO <sub>3</sub>	1,12
Na <sub>2</sub> O	0,907
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,295
TiO <sub>2</sub>	0,268
Cl	0,143
MnO	0,0849
CuO	0,012
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0118
ZnO	0,0113
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,007

что позволяет повысить качество получаемого вторичного сырья. Это особенно актуально для отходов, содержащих тяжелые металлы и другие токсичные вещества. Применение передовых методов фильтрации и очистки способствует устранению этих примесей, делая материалы более безопасными для повторного использования.

Таблица 6  
Гранулометрический состав щебня из бетонного лома

Наименования остатков	Остатки на ситах, % по массе						
	12,5	10	7,5	5	2,5	1,25	Дно
Частные	0,1	1	58,0	28,0	11,6	0,9	0,4
Полные	0,1	1,1	59,1	87,1	98,7	99,6	100

Еще одним направлением может стать возможность использования искусственного интеллекта для оптимизации процессов сортировки и переработки строительных отходов. Эти технологии позволяют более эффективно идентифицировать различные типы материалов и определять наиболее подходящие методы их переработки [16].

Важной частью исследований является также изучение жизненного цикла вторичных строительных материалов. Это включает анализ воздействия на окружающую среду на всех этапах: от сбора и переработки отходов до производства и использования конечной продукции. Такой подход позволяет оценить экологическую целесообразность и эффективность переработки материалов, для чего требуется формирование информационных систем сбора инженерно-экологических характеристик окружающей среды в местах производства, использования и утилизации строительных материалов как в форме информации в экологических декларациях, так и в самостоятельном виде [17, 18].

Вышеперечисленные направления исследований и разработок открывают большие возможности для улучшения экологической устойчивости в секторе строительства, а также для сокращения потребления первичных ресурсов и снижения объема строительных отходов.

Повсеместное внедрение экономики замкнутого цикла за счет внедрения рациональных схем переработки, применения новых поколений оборудования, технологий и инновационных исследований приведет к улучшению качества и доступности вторичного щебня, снижению его стоимости, что обеспечит его конкурентоспособность с природными заполнителями [19, 20].

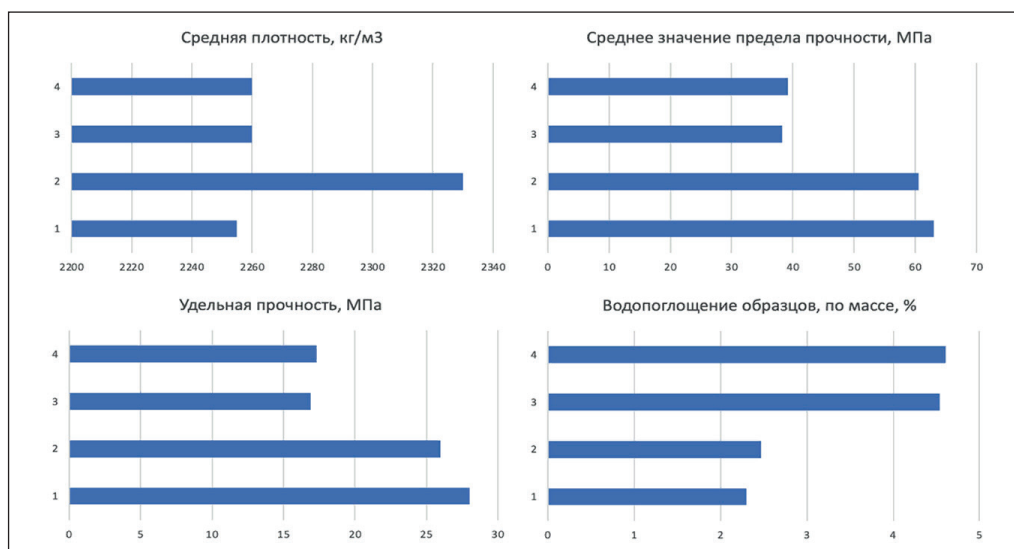


Рис. 3. Сравнение основных характеристик образцов бетона на природном заполнителе (1, 2) и вторичном заполнителе (3, 4)

Таблица 7

Физико-механические характеристики щебня

Основные характеристики	Ед. изм.	Результаты испытаний
Истинная плотность, $\rho_{ист}$	кг/м <sup>3</sup>	2590
Насыпная плотность, $\rho_{нас}$	кг/м <sup>3</sup>	1205
Водопотребность, Вп	%	4,8
Содержание зерен пластинчатой (лещадной)	%	18,7
Содержание пылевидных	%	1,2
Марка по дробимости щебня	—	600
Потеря массы при определении марки по дробимости	%	10,0
Содержание слабых зерен прочностью менее 20 МПа	%	3

Таблица 8

Составы бетонной смеси

№ состава бетонной смеси	Цемент %	Крупный заполнитель				Мелкий заполнитель Кварцевый песок		Вода кг/м <sup>3</sup>
		Природный		Вторичный		кг	%	
		кг	%	кг	%			
1	487	1094	100	—	—	625	100	180
2	487	1094	100	—	—	437,5	70	180
3	487	—	—	972	100	625	100	180
4	487	—	—	972	100	437,5	70	180

ВЫВОДЫ

Во исполнение современного законодательства, учитывая положительные свойства и в связи со значительным в настоящее время и все возрастающим с течением времени объемом сносимых аварийных, морально устаревших и разрушенных в ходе конфликтов зданий, вопрос расширения номенклатуры изделий из вторичного бетонного щебня является актуальным. Это может быть не только более широкое использование его в качестве заполнителя для производства новых строительных материалов и изделий, но и в следующих случаях:

- применение в качестве водопроницаемого покрытия пешеходных дорожек, подъездных путей, с целью фильтрации осадков и уменьшения количества сточных вод, которые должны отводиться ливневой канализацией;
- как основание под рельсы на железнодорожных путях благодаря своей устойчивости к динамическим нагрузкам;

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

- наполнение проволочных габионов, которые могут служить не только в декоративных целях, но и в качестве подпорных стен, укрепления береговых линий водоемов и т.п.;
- в качестве выстилающего слоя при оборудовании новых полигонов ТБО для исключения попадания вредных веществ в грунт;
- в качестве заполнителя для декоративных штукатурок;
- в качестве компонента композиционного вяжущего из порошков механического помола из фракции отработанного бетона с низкими остаточными прочностными характеристиками и размолосопособностью [21].

Новейшие исследования и разработки не только способствуют улучшению экологической безопасности и эффективности переработки строительных отходов, но и открывают пути для создания новых, более устойчивых строительных материалов и технологий, в том числе и на основе вторичного щебня.

В целом, вторичный щебень представляет собой ценный ресурс, способствующий развитию экономики в целом и сокращению вредного воздействия строительной индустрии на экологию, хотя его свойства могут отличаться от природного щебня. Важно учитывать эти различия при выборе материала для конкретных строительных задач.

Добавление наночастиц во вторичный бетон является одним из перспективных направлений

в области строительных материалов, поскольку это позволяет значительно улучшить свойства бетона и расширить область его применения. Наночастицы могут значительно увеличивать прочность и устойчивость [22] вторичного бетона к различным внешним воздействиям. Это достигается за счет того, что наночастицы заполняют микропоры в бетоне, улучшая его плотность и однородность. Внедрение нанотехнологий в процесс производства бетона открывает новые возможности для улучшения его характеристик и продления эксплуатационного периода. Использование наночастиц, таких как наносиликаты, способствует усилению защитных свойств бетона, предотвращая его раннее старение и износ. Это особенно актуально для условий, где бетон подвергается воздействию коррозионно-активных сред, таких как соли или кислоты. Наночастицы могут значительно увеличить химическую стойкость материала, препятствуя проникновению агрессивных агентов и разрушению ими, что делает бетон более долговечным и надежным в эксплуатации. Сфера добавления наночастиц в бетон активно исследуется, регулярно появляются новые данные о влиянии различных наноматериалов на свойства бетона. Нанотехнологии в строительстве открывают новые возможности для повышения качества и долговечности строительных материалов, в том числе бетона, полученного из вторичных источников.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yeheyis M. et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*; 15 (81–91): 2013.
2. Dewagoda K.G. et al. Driving systematic circular economy implementation in the construction industry: A construction value chain perspective. *Journal of Cleaner Production*; 381: 2022.
3. Saimanova O.S. et al. Methods of organizing work on construction and demolition waste recycling. *BIO Web of Conferences*; 43 (8): 2022.
4. Сысоева Е.А. Экономика и экология // Проблемы современной экономики. 2019. № 2 (70). <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=6642>
5. Банникова А.С., Чепелева К.В., Пухова В.В. Рециклинг в строительстве: проблемы и перспективы развития на территории Восточной Сибири. // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 14–21.
6. Васильева А., Мерцалова А., Воронов А. Против слома есть приемы // Газета «Коммерсантъ» № 24 от 10.02.2022. <https://www.kommersant.ru/doc/5206904>
7. Олейник П.П., Олейник С.П. Организация системы переработки строительных отходов. М.: МГСУ, 2009. 250 с.
8. Рекомендации по применению продуктов переработки некондиционных бетонных и железобетонных изделий. НИИЖБ: М., 1984. 9 с.
9. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Исследование состава и физико-механических свойств вторичного щебня из дробленого бетона // Строительные материалы. 2014. № 6. С. 41–45.
10. Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В. В. Исследование зависимости зернового состава и марки рециклингового щебня по дробимости от прочности исходного



утилизируемого бетона // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 3. С.5–16. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-5-16](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-5-16)

11. Анфимова А. Ю. Проблемы утилизации строительного мусора в процессе реновации // Вестник. 2019. №1 (2), URL: <https://vestnik.mi.university/journal/article.php?id=2152>

12. Кальгин А.А., Фахратов М.А., Сохряков В.И. Опыт использования отходов дроблёного бетона в производстве бетонных и железобетонных изделий // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 32–33.

13. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю. Базальтовый продукт пылеудаления в составе органоминерального комплекса для производства бетонных смесей. Химия, физика и механика материалов. 2020. № 3 (26). С. 60–72.

14. Флорес-Вивиан И., Прадото Р., Моини М., Кожухова М.И., Потапов В.В., Соболев К.Г. Влияние SiO<sub>2</sub>-наночастиц на свойства цементных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 6–16.

15. Aleksandrova O.V. et al. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. Materials; 15 (8851):2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248851>

16. Городнова Н.В. Применение искусственного интеллекта в проектах «SMART-ЭКОЛОГИЯ» // Дискуссия 2021. Вып.105. С. 34–48.

17. Жук П.М., Лаврусевич А.А. Геоэкологические аспекты анализа жизненного цикла строительных материалов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 3. С. 99–111. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2020.03.09>

18. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life cycle assessment (LCA) in building materials industry. XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction – The Formation of Living Environment (FORM 2018), Conference Series-Materials Science and Engineering; 106: 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052021>

19. Будзинский П.А., Дьячкова О.Н. Утилизация бетона на строительной площадке при реновации урбанизированных территорий НИУ МГСУ Потаповские чтения : сборник материалов Всероссийской научной конференции посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова 2021. С. 23–29. <https://doi.org/10.22227/978-5-7264-2875-8.2021.23-29>

20. Larsen O., Naruts V., Aleksandrova O. Self-compacting concrete with recycled aggregates. Materials Today: Proceedings, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. ICMTME; 2023–2026: 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.065>

21. Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Дроздюк Т.А., Фролова М.А., Гарамов Г.А. Интегральные показатели качества отработанного бетона для вторичного использования // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 5. С. 276–281. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-276-281>

22. Артамонова О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография // Воронежский ГАСУ. Воронеж. 2016. 100 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гранева Анна Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, a121269@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1599-6018>

**Лушин Кирилл Игоревич** – кандидат технических наук, декан факультета урбанистики и городского хозяйства, Московский политехнический университет, Москва, Россия, kirillushin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3214-6480>

**Пуляев Иван Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Московский политехнический университет, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство», Москва, Россия, ivanes50@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2784>

**Кудрявцева Виктория Давидтбеговна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технологии», Российский университет транспорта, Москва, Россия, ruslavik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5090-4839>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Гранева А.В.** – концепция исследования; написание исходного текста.

**Лушин К.И.** – научное руководство.

**Пуляев И.С.** – итоговые выводы.

**Кудрявцева В.Д.** – написание исходного текста.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 05.02.2024; принята к публикации 09.02.2024.