Снос зданий и использование материалов, образующихся при реновации городских территорий

С.А. Колодяжный, С.Н. Золотухин, А.А. Абраменко, Е.А. Артемова

Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Повторное использование строительных материалов, изделий и конструкций, образующихся после сноса зданий и сооружений, — актуальная задача, решение которой улучшит экологическую ситуацию. Цели исследования — определение причин реновации городских территорий; наиболее эффективных технологий сноса зданий с повторным использованием образующихся материалов, изделий и конструкций.

Материалы и методы. Использованы систематизация, структурный, сопоставительный анализ, теоретическое обобщение данных, полученных при детальном анализе литературных и статистических источников, натурных обследований объектов. При натурных обследованиях применены методы фотофиксации.

Результаты. Проанализированы причины и основные направления реновации городских территорий. Изучены российские и зарубежные технологии сноса зданий и сооружений. Показаны достоинства и недостатки различных видов сноса с точки зрения их экологичности и экономической эффективности. Выявлены и систематизированы существующие технологии сноса зданий, утилизации строительных отходов и повторного использования строительных материалов, образующихся при применении инновационных технологий поэтапного сноса.

Выводы. Опыт строительства малоэтажных зданий и устройства внутрипоселковых дорог показал, что технология поэтапной разборки зданий с помощью современного оборудования и техники с дальнейшим повторным использованием строительных материалов, изделий и конструкций является эффективной, экономичной и экологичной. Доказано, что повторное применение строительных материалов, изделий и конструкций приводит к значительному снижению стоимости возводимых сооружений. Результаты работы могут быть рассмотрены в малоэтажном строительстве во всем мире.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: утилизация строительных отходов, снос зданий и сооружений, умный снос, рециклинг, повторное использование строительных материалов, поэтапный снос, разборка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колодяжный С.А., Золотухин С.Н., Абраменко А.А., Артемова Е.А. Снос зданий и использование материалов, образующихся при реновации городских территорий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 271–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.271-293

Destruction of buildings and use of materials from renovated urban territories

Sergey A. Kolodyazhny, Sergey N. Zolotukhin, Anatoliy A. Abramenko, Yekaterina A. Artemova

Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Reuse of construction materials, products, and structures from demolished buildings and installations is an actual problem. The solution to it will improve the ecological situation. The study is aimed at the determination of the causes of urban area renovation and searches for the most efficient technologies of building demolition with the reuse of the generated materials, products, and structures.

Materials and methods. The study used systematization, structural analysis, comparative analysis, a theoretical generalization of the data obtained in a detailed analysis of literary and statistical sources, field surveys of objects. When field examining, photography methods were used.

Results. Existing technologies of the building demolition, construction waste recovery, and reuse of construction materials generated using innovative item-by-item demolition technologies were revealed and systematized. Causes and main trends of urban territory renovation were analyzed. The paper studied Russian and foreign technologies of the building and installation demolition. The pros and cons of various demolition types are shown in terms of their environmental friendliness and economic efficiency.

Conclusions. The experience of constructing low-rise buildings and intrasettlement roads showed that the item-by-item disassembly of buildings using modern equipment and machinery with the subsequent reuse of construction materials, products, and structures is efficient, economical, and environment-friendly. It is proven that the reuse of construction materials, products, and structures results in a significant reduction in the cost of erected installations. The results of the study can be applied in low-rise construction around the world.

KEYWORDS: construction waste recovery, demolition of buildings and installations, “smart” demolition, recycling, reuse of construction materials, item-by-item demolition, disassembly

FOR CITATION: Kolodyazhny S.A., Zolotukhin S.N., Abramenko A.A., Artemova Ye.A. Destruction of buildings and use of materials from renovated urban territories. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):271-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.271-293 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение и развитие городов как территорий исторически складывалось с появлением промышленных предприятий, которые обрастали застройками жилых домов, общественных зданий, научных, культурно-досуговых центров, медицинских учреждений. Дальнейшее укрупнение городов происходило при присоединении близлежащих поселений при постоянном становлении городского хозяйства, железнодорожного и автомобильного транспорта. Появление новых технологий и материалов в строительстве приводило к изменению внешнего облика зданий и сооружений, их внутреннего пространства. Политические процессы, войны, революции, промышленный прогресс, научно-техническая революция, также накладывали и накладывают отпечаток на внешний облик городов. Вышеназванные факторы обуславливали естественную необходимость реновации городских пространств.

Другие показатели, приводящие к реновации городских пространств:

- моральный и физический износ здания;
- различные сроки службы элементов городской среды;
- частичная или полная утрата архитектурных, исторически сложившихся архитектурных качеств городской среды;
- неэффективное использование городских территорий.

Реновация может быть локальной, точечной, иногда захватывать целые городские кварталы и города полностью. При реновации особо выделяются кварталы, отдельные здания, имеющие историческую ценность, которые охраняются государством, и изменение их внешнего облика невозможно [1–4]. Эти здания и кварталы подвергаются реставрации.

При реставрации выполняется комплекс мероприятий, направленный на предотвращение последующих разрушений и достижение оптимальных условий продолжительного сохранения памятников материальной культуры, обеспечение возможности в дальнейшем открыть его новые, неизвестные ранее свойства [5–7].

Новым направлением бережного отношения к истории и культуре строительства, при котором не происходит снос зданий, доказавшим свою жизнеспособность, стала джентрификация [8–9]. Термин «джентрификация» был введен в 1964 г. Рут Гласс в работе «Лондон: Аспекты изменения» («London: Aspects of Change») для описания вытеснения рабочего класса из отдельных районов Лондона средним классом. Сходный процесс происходил в различных городах США во второй половине XX в., в частности, в отдельных районах городов залива Сан-Франциско, Бостоне, Чикаго, Сиэтле, Портленде, Атланте, Вашингтоне, Денвере^{1, 2}. Классическими примерами успешной джентрификации считаются квартал Марэ в Париже, Ноттинг-Хилл в Лондоне, Флорентин в Тель-Авиве, Морария в Лиссабоне [10]. Успешный образец джентрификации промышленных зданий — первый в Африке музей современного искусства Zeitz Museum, открывшийся в 2017 г. в Кейптауне на месте зернохранилища; торгово-офисный хаб, образованный на месте обувной фабрики, основанной в 1886 г. в Вилья Креспо в Буэнос-Айресе. Сегодня Вилья Креспо — уютный район в центре с элитным жильем, чистыми безопасными улицами и множеством заведений и магазинов на любой вкус.

Примером джентрификации, вызванной природной катастрофой (землетрясением магнитудой 8,1 баллов по шкале Рихтера), является Ла Рома в Мексике, где было сосредоточено много промышленных предприятий в 1985 г. Следы той катастрофы можно увидеть на улицах Ромы и по сей день. Сегодня здесь работают кафе, рестораны, галереи, театры, бутики и различные ремесленные мастерские².

Иллюстрациями джентрификации и перепрофилирования в г. Москве служат ул. Остоженка, территория кондитерской фабрики «Красный Ок-

¹ Не только Нью-Йорк: 5 примеров джентрификации со всего света. URL: <http://www.vokrugsveta.ru/article/302900/>

² Санация панельного жилого фонда как альтернатива строительству новых домов. URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/749>

тябрь», деловые кварталы «Красная Роза», «Новоспасский Двор» и Центр современного искусства «Винзавод»².

Реновация территорий, застроенных панельными домами по массовым проектам в послевоенное время, связана с тем, что в 90-х гг. эти здания потеряли свою внешнюю привлекательность и не удовлетворяли современным требованиям норм проживания. В настоящее время на этих территориях определились два основных направления реновации — это снос зданий либо их санация³.

Основным критерием для принятия решений о последующей судьбе таких зданий был выбран уровень физического износа их несущих конструкций. Соответственно, при значении данного показателя более 60 % принималось решение о сносе здания с возможным строительством на освободившемся месте новой постройки. Если данный показатель был меньше 60 %, то принималось решение о санации здания путем: надстройки дополнительных этажей, в том числе мансардных; расширения площади квартир на основе их перепланировки; создания новых мест общего пользования; утепления фасадов домов; модернизации системы теплоснабжения; установки стеклопакетов; внедрения систем энергосбережения и технологий централизованного учета коммунальных ресурсов.

В Чехии микрорайоны из панелек (так здесь называют блочные дома) есть в каждом городе. Во времена строительного бума в 70–80-е гг. большинство новостроек в Чехословакии были возведены этим быстрым и дешевым способом. А в 90-е государство передало их в руки жилищных кооперативов. Местным властям удалось аккумулировать деньги региональных бюджетов, Евросоюза и владельцев квартир в данных домах, за счет которых и началась масштабная реконструкция жилого фонда. В рамках реконструкции изменялись планировки, осуществлялся капитальный ремонт, заменялись окна, устанавливались современные лифты и т.д. В результате проведенных работ старых пятиэтажек в их классическом виде в стране почти не осталось. Когда-то унылые районы окрасились в яркие цвета и стали намного привлекательнее для покупателей и уютнее для жителей. В то же время по окончании модернизации вырос не только спрос на это жилье, но и его цены⁴. В Польской Народной Республики в панельных домах в настоящее время проживает каждый третий поляк, поэтому в настоящее время идет облагораживание спальных райо-

нов: многоэтажки утеплили, прежде всего крыши и фасады.

В Восточной Германии около 2,1 млн квартир панельной застройки в 90-х гг. были либо полностью (60 %), либо частично (25 %) санированы. И только незначительная часть жилья осталась не санирована. Определенные дома подлежали сносу. Причем решение о проведении сноса, как правило, было обусловлено структурными изменениями в восточногерманских регионах — демографическими и экономическими — и не имело никаких технических оснований. На рынке санированное панельное жилье принимается жильцами с большим удовольствием. Притом повышение рыночной стоимости и имиджа квартир может происходить благодаря мероприятиям по улучшению придомовой территории — созданием скверов, игровых площадок, стоянок для автомашин⁴.

Исключительной мерой, связанной с градостроительными и другими объективными обстоятельствами (высокий физический и моральный износ, аварийное состояние и т.д.), считается снос зданий³. Снос зданий имеет четко выраженную стратегическую направленность. Это обусловлено тем, что демонтаж сооружений представляет собой первое звено в цепочке строительных работ на определенном участке. Он включает в себя целый спектр работ. Это, среди прочего: разборка инженерных коммуникаций, оконных и дверных проемов, снос кровли, демонтаж металлических и железобетонных конструкций перекрытий, снос перегородок и стен, демонтаж фундамента.

Причины сноса зданий в различных странах мира:

- в Америке время эксплуатации жилья определяется целым рядом сводов и правил, существенно меняющихся от штата к штату. Неким унифицированным сроком использования домов без капитального ремонта считается 30 лет;
- в Германии сносятся либо ветхие дома, в которых конструкции не отвечают требованиям безопасности, либо жилой фонд, который пустует. К примеру, в Восточной Германии около 30 % квартир простаивает, потому что люди стараются жить там, где есть работа;
- в Китае дома сносятся не только быстро, но и часто [11]. Жилищная политика здесь нацелена не на проведение капитальных ремонтов жилых домов, а на их снос и строительство новых. Согласно расчетам китайских специалистов, дешевле построить новый современный жилой многофункциональный комплекс, чем ремонтировать физически и морально устаревшие строения [11];
- в Великобритании, чтобы дом попал под снос, ему совсем не обязательно быть ветхим. Достаточно

³ Снос здания. URL: <https://zem-advokat.ru/practice/item/snos-zdaniya/>

⁴ Зарубежные «хрущевки»: что происходит с панельными домами в Восточной Европе. URL: https://www.m24.ru/articles/stroitelstvo/07112014/59415?utm_source=CopyBuf

не соответствовать эстетическим вкусам горожан. Городские власти могут прийти к выводу, что здание портит местный пейзаж. Так, в Глазго стерли с лица земли сразу шесть высотных домов в 32 этажа.

В Российской Федерации для сноса здания могут существовать различные причины:

- аварийное состояние — повреждения и деформации несущих конструкций, которые приводят к исчерпанию их несущей способности;
- физический износ здания — утрата несущими конструкциями здания первоначальных технико-эксплуатационных качеств (прочности, устойчивости, надежности и др.) в результате воздействия природно-климатических факторов и жизнедеятельности человека;
- недопустимое состояние — ситуация, при которой существует опасность пребывания людей, в связи со снижением несущей способности здания [12–15];
- моральный износ здания — отклонение основных эксплуатационных показателей от современного уровня технических требований эксплуатации зданий и сооружений [16, 17];
- при самовольной постройке здания (ч. 5 ст. 55.30 Градостроительного кодекса РФ)⁵.

Цель исследования — проведение сравнительного анализа современных методов сноса зданий, утилизации и повторного применения образующихся материалов, с выявлением наиболее экономически целесообразных технологий сноса.

⁵ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ (ред. 2019 г.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа является одним из итогов проводимых авторами исследований в области повторного использования строительных материалов, изделий и конструкций, образующихся при сносе зданий и сооружений. Изучены технологии сноса зданий и сооружений, малоэтажного строительства и устройства внутрипоселковых дорог, площадок. Проведен комплексный анализ отечественного и зарубежного опыта в области сноса зданий, утилизации строительных отходов. Изучены современные технологии сноса и повторного использования строительных материалов, изделий и конструкций, образующихся при этом. Выполнен сравнительный анализ изученного материала. Осуществлена систематизация и структурирование полученных результатов анализа с выявлением наиболее экономичных и экологических способов сноса и дальнейшего использования строительных материалов, изделий и конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в мире существуют различные методы сноса зданий и сооружений. Далее рассмотрены наиболее известные методы массового сноса.

Взрывной метод

Этот метод разрушения зданий применяется при массовом сносе кварталов застройки или отдельных зданий при реконструкции городской застройки (рис. 1).

Рис. 1. Снос зданий методом взрыва

Fig. 1. Demolition of buildings by the explosion

Чаще этот метод используется при сносе многоэтажных зданий в Америке, Китае, Великобритании, Германии³ [11, 18–22]. Подготовка к взрыву занимает много времени. Из здания извлекаются провода, двери или трубы. Должны быть обязательно удалены стекла. Несущие колонны бурят, в отверстия помещается взрывчатка. Подрывники стараются использовать настолько мало взрывчатки, насколько это возможно, взрывчатые вещества размещают не на всех этажах [20, 21].

Основной принцип взрывного метода состоит в создании динамических нагрузок, обеспечивающих разрушение несущих конструкций нижнего и вышележащих этажей, в результате чего достигается потеря устойчивости здания и его обрушение.

Снос здания взрывом редко применяется на территории России, поскольку законодательством наложены серьезные ограничения на применение взрывчатых веществ [18, 19].

Опыт разрушения жилых домов показал, что в условиях плотной застройки взрывной метод имеет ряд недостатков, к которым следует отнести:

- негативное влияние динамических нагрузок на соседние здания;
- высокую запыленность прилегающих территорий и строений в результате аэродинамического эффекта оседания продуктов разрушения;
- неоднородное измельчение армоконструкций, что в последующем требует больших трудозатрат

на ликвидацию связей между продуктами разрушения;

- затрудняется процесс погрузки и транспортирования разрушенных элементов вследствие различных габаритов, наличия арматуры, трубопроводов, разнородных материалов, поэтому эффективность перевозки не превышает 30 % от грузоподъемности автотранспортных средств;

- появляются экологические проблемы утилизации материалов разрушения, так как при таком методе сноса образуются огромные объемы строительного мусора, под которые необходимо выделять внушительные площади земли [18–22].

Механизированный способ

При сносе 1–9-этажных зданий наиболее распространенным в настоящее время является использование специальной техники. До середины 1990-х гг. применялся метод ударного разрушения конструкций шар- или клин-молотом, подвешиваемым на тросах к стреле самоходного крана или экскаватора.

В настоящее время появилась новая техника, которая разрушает здания и сооружения при помощи экскаваторов на гусеничном ходу. Экскаваторы оснащены специализированным гидравлическим инструментом — гидронулти, гидромолот, гидротолкатель, мультипроцессор и гидроклин для разрушения элементов из бетона (рис. 2).

Рис. 2. Применение гусеничной техники с использованием гидромолота при механизированном сносе здания
Fig. 2. Usage of the tracked vehicle-based hydraulic hammer in mechanized building demolition

Механизированный способ разрушения — весьма производительный и позволяет снести любое здание, не повреждая окружающие строения и территорию, применяя технику, которая наиболее эффективно может решить задачи по сносу. Главный минус данного метода — образование огромных объемов строительных отходов, которые сложно использовать повторно в строительных конструкциях или переработать методом рециклинга, ввиду высокой трудоемкости по сортировке. Поэтому строительные отходы должны вывозиться на мусорные полигоны. Учитывая мировые тенденции по рациональному использованию строительных отходов, можно сказать, что механизированный способ сноса зданий и сооружений является устаревшим [20, 21].

Специальные способы обрушения

К специальным способам обрушения объекта и его конструкций относятся: гидровзрывной, термический, электрогидравлический и способ гидрораскалывания.

Гидровзрывной способ используется тогда, когда необходимо разрушить конструкции коробчатой формы, резервуаров и т.п., а также каменных, бетонных и железобетонных конструкций⁶. Технология данного способа заключается в заполнении свободного пространства шпуров водой или глинистым раствором. К минусам относится необходимость дорогостоящего специального оборудования и высокая стоимость выполнения работ. Широкого применения не находит.

Термический способ эффективен при разрушении монолитных бетонных и железобетонных конструкций⁷. Термическая резка конструкций производится с использованием мощного источника тепла в форме высокотемпературного газового потока или электрической дуги. Принцип действия этого способа заключается в плавлении бетона продуктами сгорания железа в струе кислорода, поступающего в сгораемую трубу в количестве, достаточном для горения и выноса шлака из прорезаемой конструкции. Метод является экологически небезопасным и требует высококвалифицированных специалистов и дорогостоящего оборудования. Поэтому в настоящее время он не нашел широкого применения.

Электрогидравлический способ применяется для разрушения монолитных бетонных и каменных массивов, бутобетонной и каменной кладки⁷. Применение электрогидравлического способа характеризуется отсутствием взрывной волны и разлета осколков и является безопасным для работающих вблизи людей и установленного оборудования. Не-

достатком служит то, что он может быть использован только для разрушения и дробления твердых тел небольших габаритов, так как разрушаемое твердое тело необходимо поместить в ванну, заполненную жидкостью. Широкого применения не находит.

Способ гидрораскалывания используется для разрушения монолитных бетонных и кирпичных конструкций в стесненных условиях⁷. Он основан на применении гидравлических раскалывателей, представляющих клиновые устройства с гидроцилиндрами. Для разрушения конструкции в ней пробуривается скважина, в которую вставляется клиновое устройство и с помощью гидроцилиндра приводится в действие. В результате развиваемое гидроцилиндром усилие увеличивается в несколько раз. Разрушение конструкции происходит бесшумно и без разлета кусков и осколков. Но экономически целесообразно его использовать только в стесненных условиях.

Поэлементная разборка зданий «Тесогер» с опусканием здания гидравлическими домкратами

В Японии применяется способ поэлементной разборки зданий и сооружений, условно названный «срезать и опустить» (рис. 3) [22].

Суть технологии заключается в предварительном устранении всех элементов интерьера и ненесущих конструкций, и в дальнейшем срезании несущих конструкций первых этажей здания, которые заменяются особыми гидравлическими домкратами, выдерживающими нагрузку до 1200 т. Затем сносятся все остальные элементы конструкции этажа, а образовавшийся мусор тут же сортируется и вывозится с площадки, после чего уровень домкратов понижается для перехода к демонтажу следующего этажа.

При спуске материалов вниз на внутреннем лифте генерируется энергия, которая затем используется для питания техники и инструментов.

При этой технологии крыша зданий не сносится, что защищает рабочих от непогоды и снижает шум выполняемых работ на 17 дБ [22]. Вред, наносимый окружающей среде, при демонтаже зданий по технологии «Тесогер» отсутствует. Технология также позволяет повторно использовать материалы, образующиеся при сносе здания.

К недостаткам данного метода следует отнести необходимость применения сложного, дорогостоящего оборудования, высокую трудоемкость выполняемых работ.

Рециклинговые технологии сноса зданий

1. Технология «умного сноса».

При проведении реновации в Москве в настоящее время используют технологию «умного

Рис. 3. Снос здания японским методом «срезать и опустить»

Fig. 3. Demolition of the building by the Japanese “cut and drop” method

сноса». «Умный снос» — это работы, проходящие в несколько этапов [23, 24]. На первом этапе внутри здания демонтируют отдельные элементы с разделением отходов по группам (например, фаянс и керамика, стекло, столярные изделия). Затем мусор вывозят на специализированные полигоны для переработки с целью повторного использования.

На втором этапе оставшийся нетронутым каркас здания демонтируют при помощи экскаватора с тем, чтобы строительный мусор скапливался внутри здания, а не снаружи. Остатки конструкций вывозят на полигоны, где их измельчают и перерабатывают. Остатки армирования (металлолом) отделяются и направляются на переплавку.

Основной объем строительного мусора после демонтажа здания составляет железобетон, бетон и кирпич. Отходы сортируются спецтехникой. Крупногабаритные глыбы крошатся, а затем перерабатываются в дробилках, устанавливаемых прямо на площадке. Продуктом рециклинга является щебень, который широко используется для отсыпки технологических дорог, заполнения пазух котлованов, устройства дренажа на болотистых территориях [25–31].

Среди преимуществ рециклинга «умного сноса»:

- снижение объемов отходов, подлежащих захоронению;
- сбережение природных сырьевых ресурсов;
- уменьшение потребности в транспортировке материалов от отдаленных сырьевых источников, а также в транспортировке строительных отходов на полигоны захоронения;
- снижение нагрузки на природную среду в результате уменьшения добычи исходных материалов и захоронения строительных отходов.

Причина, мешающая осуществлению рециклинга, — отсутствие непрерывности процесса накопления перерабатываемых строительных отходов, что частично затрудняет рациональное использование промышленных установок переработки отходов [32–39]. Недостатком этого способа служит дороговизна получаемых каменных материалов, их низкая однородность и прочность. Последующее их использование требует специального обоснования. При этом основным потребителем такого материала становится главным образом дорожная отрасль, где данные материалы применяются для устройства насыпей, отсыпки откосов. К недостаткам также можно отнести затруднение процесса погрузки, низкую эффективность перевозок, так как сложно обеспечить полноту загрузки поломанных железобетонных конструкций, что повышает себестоимость производства работ.

2. Поэлементная разборка зданий с повторным использованием материалов, изделий и конструкций.

Наиболее интересным при проведении литературного обзора является пример сноса, проведенный в Канаде компанией «Краун корпорэйшн» здания «Вест-Гейт Аннекс» старого тюремного комплекса «Оакалла», где главная техническая задача заключалась в направлении строительных материалов, образующихся при технологии поэлементного демонтажа, не на свалки ТБО, а на повторное использование и переработку⁷. После получения задания подрядчики разработали проект, при котором схема «утилизация — повторное использование — переработка» оказалась на 24 % дешевле, чем обычный снос. Демонтаж здания был произведен

⁷ СТО НОСТРОЙ 2.33.53-2011. Организация строительного производства. Снос (демонтаж) зданий и сооружений (с Поправкой).

в 1991 г. Три четверти бетонных стеновых блоков были использованы юношеским клубом повторно для строительства спортивных сооружений, забракованные бетонные и железобетонные конструкции дробились для получения каменного заполнителя. Пиломатериалы, металл, разнообразное оборудование, стена сухой кладки (отправлена на гипсовый завод на переработку), окна, решетки и другие изделия были на 97 % утилизированы и перепроданы. Фундамент и опоры непригодные для повторного использования по прямому назначению из-за большого количества дефектов, полученных при сносе, отправлялись на участки засыпки дороги в качестве нижнего слоя автомобильных дорог.

В итоге было захоронено только 5 %, а остальные 95 % использованы повторно либо переработаны. Полтора месяца дополнительного труда для команды, занимавшейся сносом, компенсировались продажей материалов⁸.

Позэлементная разборка зданий с применением современной техники

Исторически первым способом разборки зданий, сооружений и отдельных конструкций является ручной способ. Изначально он применялся при сносе деревянных, каменных зданий и сооружений. При этом способе разборки использовались ломы, клинья, кувалды, кирки, скапеллы, топоры. Такой вариант актуален при близком расположении соседних конструкций, которые затрудняют использование спецтехники и исключают взрывные работы. Ручной способ имеет широкое применение при реставрации исторических зданий и сооружений, при необходимости проведения особо точных работ в частичной или полной разборке объекта. Несомненным достоинством ручного способа является возможность повторного использования, образующихся при этом материалов. Его недостаток — высокая трудоемкость процесса.

Появление современных ручных инструментов для алмазной резки, работы с помощью отбойных молотков, различных резаков, сверл, расширило области применения ручного способа при разборке сборных монолитных железобетонных и металлических конструкций, повысило его производительность, снизило стоимость выполняемых работ, повысило качество получаемых после разборки материалов. Появление кранового оборудования (башенные, самоходные стреловые и крышевые краны) в комплекте с технологическим оборудованием, средствами малой механизации и механизированным ручным инструментом позволило и в России разрабатывать технологии позэлементной разборки как крупнопанельных, так и каркасных зданий.

Технология позэлементной разборки зданий с применением современной техники объединяет элементы механизированного и ручного способов с использованием средств малой механизации и включает в себя следующие этапы:

- осмотр здания специалистами по безотходным технологиям сноса;
- разработка проекта позэлементной разборки специализированной организацией;
- отключение и вывоз оборудования;
- отключение и демонтаж инженерных сетей;
- разборка деревянных конструкций — крыши, полов, перекрытий;
- разборка проемов окон, дверей;
- демонтаж несущих конструкций;
- демонтаж подвальных помещений;
- разрушение фундамента и удаление его остатков;
- инженерный и экологический надзор за сносом и сортировкой отходов по группам: стекло, дерево, пластик, металл, фаянс, кирпич, ж/б конструкции;
- определение физико-механических и экологических характеристик демонтируемых элементов;
- проектирование зданий, дорог, площадок и т.п. с применением материалов, изделий и конструкций, образующихся по данной технологии;
- инженерный надзор за проведением строительных работ.

Данная технология нашла применение при разборке как промышленных, так и гражданских зданий в г. Воронеж и повторном использовании при строительстве десятков малоэтажных жилых зданий, гостиниц, торговых центров, гаражей, физкультурного центра и внутрипоселковых дорог, площадок, дренажей, примыкающих к данным объектам [24, 40–46].

Достоинство этой технологии — огромный экологический эффект, так как 1 м³ железобетонных конструкций требует от 5000 до 6000 кг условного топлива, а при сжигании 1 т условного топлива расходуется 2,3 т кислорода и выбрасывается 2,76 т углекислого газа, и при повторном использовании огромных объемов железобетонных конструкций теплового загрязнения атмосферы земли не происходит [47]. Кроме того, строительные отходы не попадают на свалки ТБО; зафиксировано резкое снижение стоимости построенных объектов; происходит снижение логистических затрат, поскольку обеспечивается полная загрузка автотранспорта [40–46].

К недостаткам можно отнести применение ручного труда и увеличение продолжительности работ по сносу здания.

Рис. 4. Пример поэлементной разборки железобетонного каркаса с применением отбойных молотков

Fig. 4. Example of item-by-item disassembly of reinforced concrete structure using jackhammers

Рассмотрим некоторые аспекты наиболее сложных при разборке узлов сопряжений сборно-монолитных и монолитных каркасов зданий.

В России достаточно традиционной технологией поэлементной разборки здания и сооружения является разрушение узлов соединения железобетонных конструкций при помощи отбойных молотков, которые отбивают бетон и оголяют арматуру. С помощью газорезки либо болгарок арматура отрезается. Такой метод позволяет бережно отделить железобетонную конструкцию и перенести ее при помощи крановой техники к месту складирования. Минусом данной технологии служит то, что не всегда удается сохранить конструкцию в том виде и техническом

состоянии в каком она была до демонтажа, что не позволяет ее повторно использовать по своему прямому назначению. Однако авторам статьи удалось спроектировать и повторно использовать подломанные железобетонные элементы каркаса — ригели, плиты, балки, фермы в конструкциях сборно-монолитных фундаментов при малоэтажном строительстве (рис. 4) [23, 24, 48].

Современная технология поэлементной разборки железобетонных конструкций — алмазная резка (рис. 5, 6).

Это сложный технологический процесс, который выполняется специализированным инструментом: шоврезчиками, бензорезами, штроборезами

Рис. 5. Применение алмазной резки при поэлементной разборке зданий и сооружений

Fig. 5. The use of diamond cutting in item-by-item disassembly of buildings and installations

Рис. 6. Конструкции, образовавшиеся при алмазной резке

Fig. 6. Structures obtained from diamond cutting

и дисковыми пилами с применением режущих дисков с алмазным напылением.

Использование алмазного инструмента позволяет:

- быстро резать бетонные, железобетонные и кирпичные конструкции любой прочности и плотности с минимальной динамической нагрузкой на конструкции;
- получать очень ровную поверхность отверстия и контролировать его угол;
- выполнять работы с минимальным шумом, вибрацией и пылью;
- получать конструкции, пригодные для повторного использования с минимальными разрушениями узлов сопряжений.

Утилизация и повторное использование материалов, образующихся при сносе

Каждая страна, проводящая реновацию, стремится наиболее эффективно стимулировать процесс сноса старых зданий и проводит ряд мер для этого: применение целевых программ, обеспечивающих инвестирование проектов за счет предоставления субсидий, а также предоставление льгот физическим лицам по кредитованию и налоговым сборам [49–57].

Но при проведении реновации поднимается один важный и острый вопрос — утилизация строительных отходов [58–62]. Так, исследования, проводимые в Европе, доказывают, что строительный мусор составляет почти треть всех отходов, образующихся в большинстве развитых стран [49, 53–56, 58]. По данным Европейской ассоциации по сносу зданий каждый год во всем мире образуется более 2,5 млрд т строительного мусора, поэтому рациональное использование строительных отходов становится одним из главных направлений по защите окружающей среды.

В России утилизация строительных отходов — более острая проблема [23, 24, 40–46]. По данным главы наблюдательного совета Фонда содействия реформированию ЖКХ С.В. Степашина в России на 1 января 2017 г. аварийный фонд составлял 11,9 млн м². В рамках нацпроекта в 2019–2024 гг. планируется направить из федерального бюджета 431,9 млрд руб. на снос и строительство нового жилья [63]. Такие объемы сноса уже привели к тому, что, согласно статистике, объемы свалок ТБО заполнены на 10–70 % строительным мусором.

В Европе считается, что складирование строительного мусора нецелесообразно, так как оно занимает огромные площади. Совместное захоронение экологически чистого строительного мусора, обладающего большим объемом, с действительно грязными экологическими отходами — экологически небезопасно и приводит к резкому увеличению объема грязных отходов на свалках ТБО.

Рамочная директива Евросоюза об отходах гласит, что главный способ снижения строительных отходов — их переработка и дальнейшее использование. Так, в Европе к 2020 г. планируется повторно использовать не менее 70 % того, что в настоящее время является строительным мусором. Механизмы переработки и повторного использования строительных материалов начали разрабатываться в мире около 20 лет назад. На сегодняшний день можно говорить о том, что появилась целая индустрия рециклинга. В развитых странах ведется политика по ужесточению законов к захоронениям и образованиям несанкционированных свалок, а также создаются условия, при которых вывозить отходы на полигоны невыгодно. Поэтому переработка становится не просто экологически выгодной, но и экономически эффективной [64–69].

Проведенный анализ технологий сноса зданий и сооружений показывает взаимозависимость между выбранными технологиями сноса и объемами образующихся отходов: самый экологически небезопасный метод — вывоз строительного мусора на полигоны [70–77]. Данный метод чаще всего используется при механизированном и взрывном сносе зданий и сооружений, поэтому от него сейчас большинство развитых стран мира отказываются (рис. 7) [78–83].

«Умный снос» зданий приводит к образованию неоднородных низкопрочных каменных материалов, не имеющих гарантированной прочности [84–87]. В то же время многочисленные обследования несущей способности строительных материалов, изделий и конструкций, проводимые кафедрами строительных конструкций различных вузов страны, установили, что образующиеся при поэтапном сносе зданий материалы имеют прочность достаточную для строительства малоэтажных зданий. Так, несущая способность красного кирпича со сроком службы более 100 лет колебалась в пределах от марки М50 до марки М100, прочность силикатного кирпича со сроком службы 40 и более лет соответствует маркам М50–М125, прочность бетона колебалась от класса В20 до класса В90, т.е. превышала проектную прочность в 1,5–3 раза, прочность арматуры в ж/б конструкциях со сроком службы 40 и более

лет на 5–10 % превышала исходную. Согласно ВСН 39-83(р) «Инструкция по повторному использованию изделий, оборудования и материалов в жилищно-коммунальном хозяйстве», материалы, изделия и конструкции, имеющие такие прочностные показатели, могут повторно использоваться по своему прямому назначению^{8, 9, 10}. Каменные и деревянные материалы, полученные при поэтапном сносе, после их обследования применяются без ограничений.

Сборные железобетонные конструкции и изделия с шарнирным креплением после обследования и подтверждения работоспособности могут использоваться в несущих конструкциях здания по своему прямому назначению, поэтому авторы статьи использовали полученные данные при проектировании и строительстве малоэтажных зданий и сооружений.

Монолитные и сборно-монолитные ж/б конструкции, которые при поэтапной разборке были

⁸ Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (text with EEA relevance).

⁹ ВСН 39-83(р)/Госгражданстрой. Инструкция по повторному использованию изделий, оборудования и материалов в жилищно-коммунальном хозяйстве.

¹⁰ СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

Рис. 7. Вывоз строительного мусора на свалки ТБО

Fig. 7. Construction waste removal to solid waste dumps

подломаны возможно использовать в качестве конструктивных элементов фундаментов [88, 89].

Результаты исследования были применены при возведении малоэтажных зданий в г. Воронеже и пригородной зоне. Специалисты ВГТУ с 1987 г. осуществляют строительство малоэтажных зданий с повторным использованием строительных материалов, изделий и конструкций. А также используют их при устройстве поселковых дорог и укреплении грунтов оснований [40–46]. Возможность продления срока службы стройматериалов и конструкций обосновывается в работе [44]. Проведенный исторический анализ доказывает, что поэтаlementная разборка зданий с последующим повторным применением строительных материалов применялась в Воронеже уже в послевоенный период при восстановлении города, разрушенного во время войны, и показала высокую надежность повторно используемых строительных материалов, изделий и конструкций. А в настоящее время, когда осуществляется массовый снос зданий по всей стране в рамках реализации программ сноса ветхого и аварийного жилья, сноса промышленных зданий повторное применение строительных материалов позволит решить задачи нацпроектов «Доступное и комфортное жилье — гражданам России», «Безопасные и качественные автомобильные дороги», «Экология»^{10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17}. В Воронеже десятки строительных организаций и бригад совместно со специалистами ВГТУ освоили технологию поэтаlementного сноса зданий, что дает возможность прекратить вывоз строительного мусора на свалки ТБО [40–46]. К факторам, сдерживающим широ-

кое применение технологии поэтаlementного сноса с повторным применением строительных материалов, изделий и конструкций, необходимо отнести: нехватку как архитекторов, обладающих опытом проектирования подобных зданий, так и линейных работников, способных строить по данной технологии; недостаточную информированность потенциальных заказчиков. Однако объемы строительства по данной технологии постоянно растут [40–46].

Поэтаlementная разборка зданий с использованием современной техники позволила повторно использовать полученные строительные конструкции и материалы при строительстве малоэтажных зданий и устройстве оснований внутрипоселковых дорог, значительно снизив их стоимость (рис. 8, 9) [40–46, 90].

Рис. 8. Сортированные железобетонные б/у плиты перекрытия

Fig. 8. Sorted used reinforced concrete floor slabs

Рис. 9. Испытания бывших в употреблении железобетонных плит на прочность неразрушающим методом

Fig. 9. Nondestructive strength testing of used reinforced concrete slabs

В настоящее время в Воронеже и области спроектированы, построены и продолжают строиться десятки малоэтажных зданий и сооружений [40–46]. Стоимость 1 м² общей площади колебалась от 6 до 12 тыс. за м², что в 2–3 раза ниже рыночных цен в г. Воронеже [48].

На рис. 10, 11 показан процесс возведения конструкции фундамента из ранее использованных ребристых железобетонных плит перекрытия.

¹¹ Национальные проекты: целевые показатели и основные результаты URL: <http://static.government.ru/media/files/p7nn2CS0pVhvQ98OOwAt2dzCIAietQih.pdf>

¹² Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги». URL: <http://rosavtodor.ru/about/upravlenie-fda/nacionalnyj-proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi>

¹³ ВСН 39-83(Р). Инструкция по повторному использованию изделий, оборудования и материалов в жилищно-коммунальном хозяйстве.

¹⁴ Национальные проекты. Национальный проект «Доступное и комфортное жилье — гражданам России». URL: <http://static.government.ru/media/files/p7nn2CS0pVhvQ98OOwAt2dzCIAietQih.pdf>.

¹⁵ Министерство транспорта Российской Федерации. Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги». URL: <http://rosavtodor.ru/about/upravlenie-fda/nacionalnyj-proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi>.

¹⁶ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Паспорт национального проекта «Экология». URL: http://mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/.

¹⁷ О реновации жилищного фонда в Российской Федерации : Законопроект № 689840-7 от 10.04.2019.

Рис. 10. Устройство столбчатого фундамента из ранее использованных железобетонных ребристых плит

Fig. 10. Constructing post foundation from used reinforced concrete ribbed slabs

Рис. 11. Конструкция столбчатого фундамента

Fig. 11. Design of post foundation

Рис. 12. Дом, построенный с применением б/у материалов, изделий и конструкций

Fig. 12. House built with used materials, products and structures

На рис. 12 изображен дом, построенный с применением б/у материалов, изделий и конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основными причинами реновации городских территорий являются рост городов, неэффективное использование городских территорий; частичная или полная утрата архитектурных, исторически сложившихся архитектурных качеств городской среды; моральный и физический износ зданий, который приводит к необходимости санации и сноса зданий и сооружений.

Многие используемые в настоящее время технологии массового сноса зданий и сооружений сопряжены с запылением прилегающих территорий, имеют низкую эффективность при перевозке строительного мусора, образующегося при этом, и приводят к появлению экологических проблем, связанных с его утилизацией.

Технологии поэлементной разборки зданий и сооружений, используемые в различных странах, с повторным применением строительных материалов, изделий и конструкций в настоящее время наиболее экологически и экономически эффективны.

Проведенное исследование доказало, что появление современного оборудования, инструмента и техники позволяет отказаться от экологически небезопасных методов сноса зданий и сооружений.

Наиболее эффективным следует считать опыт строительства малоэтажных зданий и сооружений

в Канаде, Финляндии, России. Повторное использование строительных материалов, изделий и конструкций, образующихся при поэлементном сносе зданий, приводит к значительному снижению стоимости возводимых сооружений и дает значительный экологический эффект.

Необходимо привлечение большего числа ученых-строителей для развития и совершенствования технологий поэлементного сноса зданий с повторным использованием строительных материалов, изделий и конструкций, и распространение полученного опыта при выполнении федеральных и муниципальных программ реновации, сноса ветхого и аварийного жилья, нацпроектов «Доступное и комфортное жилье — гражданам России», «Безопасные и качественные автомобильные дороги», «Экология».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабенко Г.В., Лукин М.В.* Анализ мировых тенденций и зарубежного опыта экономического обеспечения решения задач реновации зданий городских агломераций // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 4–2. С. 314–319.
2. *Дрожжин Р.А.* Реновация городских территорий // *Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России* : тр. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Новокузнецк, 18–20 октября 2016 г. Новокузнецк, 2016. С. 307–310.
3. *Налетова А.С.* Реновация городских территорий, застроенных в 1950–1960-х годах // *Лучшая научная статья 2017*: сб. ст. IX Международного науч.-практ. конкурса. 2017. С. 271–273.
4. *Волчатова И.В., Стаценко Ю.Ю.* Возможности вторичного использования строительных материалов в рамках программы реновации жилых домов // *Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения — 2018)* : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 29 ноября–01 декабря 2018 г. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. С. 280–285.
5. *Ставцев Е.А.* Причины реновации промышленных территории и значение этого процесса в формировании современного городского пространства // *Безопасный и комфортный город* : сб. науч. тр. по мат. Всеросс. науч.-практ. конф. Орел, 27 сентября 2018 г. Орел : Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2018. С. 62–64.
6. *Моисеева А.А., Чугунов А.В.* Повышение эффективности использования территории жилой застройки в городе Воронеже на основе реализации проектов реновации // *Студент и наука*. 2018. № 1. С. 42–48.
7. *Коростин С.А.* Стимулирование малоэтажного домостроения как способ реновации жилищной политики регионов России // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 5–2. С. 415–418.
8. *Зазуля В.С.* Градостроительный потенциал «джентрификации» территорий «серого пояса» в современных условиях Санкт-Петербурга // *Актуальные проблемы архитектуры, градостроительства и дизайна: теория, практика, образование* : мат. Междунар. науч. конф. Волгоград, 23–29 сентября 2018 г. Волгоград : ВолгГТУ, 2018. С. 165–169.
9. *Афанасьев К.С.* Джентрификация и реиндустриализация в развитии городской территории // *Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина*. 2014. Т. 6. № 2. С. 48–60.
10. *Арляпова П.А., Родионова Е.В.* Джентрификация и трансформация современного городского пространства (на примере российских городов) // *Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016)* : мат. III Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Томск, 22–25 ноября 2016 г. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. С. 13–16.
11. *Huang B., Wang X., Kua H., Geng Y., Bleischwitz R., Ren J.* Construction and demolition waste management in China through the 3R principle // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 129. Pp. 36–44. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.029
12. *Бжеников А.А., Нестерова В.А.* Способы демонтажа зданий и сооружений // *Дни студенческой науки* : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам

научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры. Москва, 12–16 марта 2018 г. М., 2018. С. 432–433.

13. Музакаев Х.Г., Эртуев А.Р., Ладария Б.В., Артемян Т.Р., Жарков Д.А. Анализ реконструкции и демонтажа жилых зданий // Экономика и предпринимательство. 2018. № 7 (96). С. 905–908.

14. Исупов И.А. Анализ технологий демонтажа зданий взрывом и методом «cut and take down» // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 1. С. 307–312.

15. Князев А.А., Краснощекова А.И., Тимошенко Е.А. Особенности демонтажа зданий // Техника и технологии: пути инновационного развития : сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 29–30 июня 2018 г. Курск, 2018. С. 139–141.

16. Коноплева А.А., Петрова Т.А., Секрий М.А. Особенности демонтажа зданий и сооружений в условиях городской застройки // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : мат. Национальной науч.-практ. конф. Астрахань, 9 февраля 2018 г. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. С. 68–74.

17. Гельдыев М.Т., Аразов Б.М. Технологии сноса зданий // Молодежь и наука: шаг к успеху : сб. науч. ст. 3-й Всеросс науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 21–22 марта 2019 г. Курск : Университетская книга, 2019. С. 27–30.

18. Галаева Н.Л. Использование метода взрыва для сноса зданий и сооружений в условиях городской застройки // Перспективы науки. 2019. № 5 (116). С. 54–56.

19. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Тарасов Д.А. Использование ударного разрушения при сносе строительных конструкций // Известия КГТУ. 2011. № 20. С. 48–53.

20. Kleemann F., Lederer J., Aschenbrenner P., Rechberger H., Fellner J. A method for determining buildings' material composition prior to demolition // Building Research and Information. 2016. Vol. 44. Issue 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1080/09613218.2014.979029

21. Mihai F.-C. Construction and demolition waste in Romania: The route from illegal dumping to building materials // Sustainability. 2019. Vol. 11. Issue 11. DOI: 10.3390/su11113179

22. Добросоцких М.Г., Потехин И.А., Ким Т.С., Костина Д.П. Организация поэлементной разборки здания с повторным использованием строительных конструкций и материалов // Строительство и недвижимость. 2018. № 1–1 (2). С. 123–128.

23. Фахратов М.А., Сулейманов Х.А., Болотин О.А. Особенности бетонирования и демонтажа зданий в рамках поэлементной системы // Инновации и инвестиции. 2018. № 4. С. 341–344.

24. Jesus S., Maia C., Farinha C.B., de Brito J., Veiga R. Rendering mortars with incorporation

of very fine aggregates from construction and demolition waste // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 229. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116844

25. Jiménez J.R., Ayuso J., López M., Fernández J.M., De Brito J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 679–690. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036

26. Solís-Guzmán J., Marrero M., Montes-Delgado M.V., Ramírez-de-Arellano A. A Spanish model for quantification and management of construction waste // Waste Management. 2009. Vol. 29. Issue 9. Pp. 2542–2548. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.05.009

27. Grigoriadis K., Whittaker M., Soutsos M., Sha W., Napolano L., Klinge A. et al. Improving the recycling rate of the construction industry // Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2019. Vol. 1. DOI: 10.18552/2019/IDSCMT5044

28. Chen J., Su Y., Si H., Chen J. Managerial areas of construction and demolition waste: a scientometric review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. Vol. 15 (11). DOI: 10.3390/ijerph15112350

29. Iacovidou E., Purnell P., Lim M.K. The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 216. Pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.093

30. Rose T.M., Manley K., Agdas D. A conceptual framework to investigate the adoption of on-site waste management innovation in Australian building projects // 2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). 2017. Pp. 1830–1837. DOI: 10.1109/PICMET.2016.7806745

31. Guignot S., Touzé S., Von der Weid F., Ménard Y., Villeneuve J. Recycling Construction and Demolition Wastes as Building Materials: A Life Cycle Assessment // Journal of Industrial Ecology. 2015. Vol. 19. Issue 6. Pp. 1030–1043. DOI: 10.1111/jiec.12262

32. Pittau F., Amato C., Cuffari S., Iannaccone G., Malighetti L.E. Environmental consequences of refurbishment vs. demolition and reconstruction: a comparative life cycle assessment of an Italian case study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 296. DOI: 10.1088/1755-1315/296/1/012037

33. Islam R., Nazifa T.H., Yuniarto A., Uddin A.S.M.S., Salmiati S., Shahid S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling // Waste Management. 2019. Vol. 95. Pp. 10–21. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.049

34. Letelier V., Henríquez-Jara B.I., Manosalva M., Moriconi G. Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials // Waste Management. 2019. Vol. 94. Pp. 107–119. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.041

35. Pavlu T., Pesta J., Volf M., Lupisek A. Catalogue of Construction Products with Recycled Content from Construction and Demolition Waste // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 290. DOI: 10.1088/1755-1315/290/1/012025
36. Kianimehr M., Shourijeh P.T., Binesh S.M., Mohammadinia A., Arulrajah A. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 227. P. 11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116792
37. Akhtar A., Sarmah A.K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 186. Pp. 262–281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085
38. Cardoso R., Silva R.V., De Brito J., Dhir R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review // Waste Management. 2016. Vol. 49. Pp. 131–145. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.12.021
39. Золотухин С.Н. Возможности создания регионального кластера повторного использования строительных отходов // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 10. С. 209–212. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35191748>.
40. Золотухин С.Н., Насонова Т.В., Потехин И.А. Рациональное строительство с повторным использованием строительных материалов, конструкций, изделий после сноса здания // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 10. С. 206–209.
41. Золотухин С.Н., Лобосок А.С. Повторное использование строительных материалов и отходов производства в малоэтажном строительстве // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета: мат. межрегиональной науч.-практ. конф. «Высокие технологии в экологии». 2011. № 1. С. 63–66.
42. Золотухин С.Н., Гойкалов А.Н., Куджуку Т. Опыт строительства малоэтажных энергоэффективных зданий // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета: мат. межрегиональной науч.-практ. конф. «Высокие технологии в экологии». 2012. № 1. С. 169–172.
43. Шмелев Г.Д. Экспертный метод прогнозирования остаточного срока службы строительных конструкций по их физическому износу // Строительство и реконструкция. 2014. № 3 (53). С. 31–39.
44. Золотухин С.Н., Золотухина М.С. Использование отходов строительных материалов в дизайне спортивно-оздоровительного комплекса // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии». 2011. № 1. С. 58–62.
45. Sheffield H. Sweden's recycling is so revolutionary, the country has run out of rubbish // Independent. 2016. URL: <https://www.independent.co.uk/environment/sweden-s-recycling-is-so-revolutionary-the-country-has-run-out-of-rubbish-a7462976.html>
46. Золотухин С. Рациональное строительство. URL: <https://www.youtube.com/channel/UCYGPk70g-KwN84pSlkQPR6dg>.
47. Kien T.T., Thanh L.T., Lu P.V. Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam // The International Conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future, Hanoi. 2013. Pp. 247–256.
48. Riosa F.C., Chonga W.K., Graua D. Design for disassembly and deconstruction — challenges and opportunities // Procedia Engineering. 2015. Vol. 118. Pp. 1296–1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.485
49. Nussholz J.L.K., Rasmussen F.N., Milios L. Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. Pp. 308–316. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.036
50. Charytonowicz J., Skowronski M. Re-use of Building Materials // Procedia Manufacturing. 2015. Vol. 3. Pp. 1633–1637. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.456
51. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217. Pp. 787–797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212
52. Johansson N., Corvellec H. Waste policies gone soft: An analysis of European and Swedish waste prevention plans // Waste Management. 2018. Vol. 77. Pp. 322–332. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.015
53. Huuhka S., Kaasalainen T., Hakanen J. H., Lahdensivu J. Reusing concrete panels from buildings for building: Potential in Finnish 1970s mass housing // Resources, Conservation and Recycling. 2015. Vol. 101. Pp. 105–121. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.05.017
54. Arm M., Wik O., Engelsen C.J., Erlandsson M., Hjelmar O., Wahlström M. How does the European recovery target for construction & demolition waste affect resource management? // Waste and Biomass Valorization. 2017. Vol. 8. Pp. 1491–1504. DOI: 10.1007/s12649-016-9661-7
55. Yazdanbakhsh A. A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies // Waste Management. 2018. Vol. 77. Pp. 401–412. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.024
56. Blengini G.A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Ita-

- ly // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 2. Pp. 319–330. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.03.007
57. *Bribián I.Z., Capilla A.V., Usón A.A.* Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential // *Building and Environment*. 2011. Vol. 46. Issue 5. Pp. 1133–1140. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002
58. *Wu H., Zuo J., Zillante G., Wang J., Yuan H.* Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 240. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118163
59. *Eberhardt L.C.M., Birgisdottir H., Birkved M.* Potential of circular economy in sustainable buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/9/092051
60. *Aras F.* Monitoring the dynamic properties of a nine-story reinforced concrete building during its demolition // *Structural control & Health Monitoring*. 2019. Vol. 26. Issue 11. DOI: 10.1002/stc.2456
61. *Бухарова О.* Глава наблюдательного совета Фонда содействия реформированию ЖКХ Сергей Степашин рассказывает о программе переселения // *Российская газета*. 2018. № 7724 (261).
62. *Yu B., Wang J., Li J., Zhang J., Lai Y., Xu X.* Prediction of large-scale demolition waste generation during urban renewal: A hybrid trilogy method // *Waste Management*. 2019. Vol. 89. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.063
63. *Hossain M.U., Ng S.T.* Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 142. Pp. 10–23. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.010
64. *Sakai S., Poudel R., Asari M., Kirikawa T.* Disaster waste management after the 2016 Kumamoto Earthquake: A mini-review of earthquake waste management and the Kumamoto experience // *Waste Management and Research*. 2019. Vol. 37. Pp. 247–260. DOI: 10.1177/0734242X18815948
65. *Rosado L.P., Vitale P., Penteado C.S.G., Arena U.* Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil // *Waste Management*. 2019. Vol. 85. Pp. 477–489. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.011
66. *Hu K., Chen Y., Naz F., Zeng C., Cao S.* Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste // *Waste Management*. 2019. Vol. 85. Pp. 396–404. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.007
67. *Nussholz J.L.K., Nygaard Rasmussen F., Milios L.* Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 141. Pp. 308–316. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.036
68. *Гурфов А.О.* Анализ зарубежного опыта утилизации строительных отходов // Лучшая студенческая статья 2016 : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конкурса. Пенза : Наука и Просвещение, 2016. С. 18–22.
69. *Гойкалов А.Н. Потапенко Е.А.* Эффективность применения ячеистых бетонов в ограждающих стеновых конструкциях гражданских зданий // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии»*. 2012. № 1. С. 58–61.
70. *Будник М.С., Карпова Т.С.* Демонтаж зданий и вторичное использование материалов // Материалы 57-й студенческой науч.-техн. конф. инженерно-строительного института ТОГУ. Хабаровск, 17–27 апреля 2017 г. Хабаровск, 2017. С. 48–51.
71. *Бахтина А.А., Охлопкова Т.В.* Использование вторичных строительных материалов для зеленого будущего // *Современные научные исследования и разработки*. 2018. Т. 3. № 4 (21). С. 29–30.
72. *Золотухин С.Н., Луганский В.И., Назаренко Н.Г., Демиденко А.И., Макарычев К.В., Борисова М.И. и др.* Повторное использование железобетонных элементов зданий в конструкциях фундаментов // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 1 (20). С. 72–91.
73. *Барсук Е.А.* Вторичное использование строительных материалов в Черноземье // *Будущее науки — 2019 : сб. науч. ст. 7-й Междунар. молодежной науч. конф. Курск, 25–26 апреля 2019 г. Курск, 2019. С. 11–13.*
74. *Слаутина К.А., Жуков М.М.* Вторичное использование и утилизация строительных материалов на примере бетона с легким заполнителем // *Технические науки: проблемы и решения : сб. ст. по мат. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 21 мая 2019 г. М. : Интернаука, 2019. С. 100–103.*
75. *Андрюченко В.В., Галаева Д.Х.* Область применения отработанных строительных материалов // *Безопасный и комфортный город : сб. науч. тр. по мат. I Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Орел, 29 сентября 2017 г. Орел, 2017. С. 179–182.*
76. *Лукашевич Д.С., Туров А.В.* Строительные материалы на основе промышленных отходов // *Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сб. ст. XXI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 16–17 апреля 2019 г. Пенза : РИО ПГАУ, 2019. С. 70–72.*
77. *Лукаш А.А., Лукутцова Н.П.* Эффективные строительные материалы и изделия из техногенных отходов для жилищного строительства // *Вестник*

Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 2. С. 26–37.

78. Тихонова И.Н., Лега С.Н. Экологические проблемы образования и утилизации ТБО и строительных отходов в регионе КМВ // Электронный научно-образовательный вестник «Здоровье и образование в XXI веке». 2017. Т. 19. № 7. С. 49–53. DOI: 10.26787/nydha-2226-7417-2017-19-7-49-53

79. Кудряшова Т.В., Баланина А.А., Свеженцева М.А. Проблемы утилизации строительных отходов и перспективы их решения // Актуальные проблемы и перспективы социально-экономического развития современной России : сб. ст. Всеросс. науч.-практ. конф. Великий Новгород, 24 марта 2017 г. Великий Новгород, 2017. С. 57–61.

80. Крыгина А.М., Крыгина Н.М. К вопросу воспроизводства жилищной недвижимости на основе рециклинга отходов строительной отрасли // Жилищные стратегии. 2018. Т. 5. № 3. С. 353–366.

81. Боденко Е.М., Перепеченов А.М. Геоэкологическая оценка способа сбора и вывоза строительных отходов в городской черте в процессе подготовки объекта к сносу // Естественные и технические науки. 2018. № 5 (119). С. 143–148.

82. Лютов В.Н., Барановская М.С. Особенности и перспективность современной технологии вторичной переработки железобетонных изделий в жилищном строительстве // Ползуновский альманах. 2016. № 1. С. 139–142.

83. Лунев Г.Г. Оценка экономического эффекта переработки конструкционных вторичных строительных ресурсов на предприятиях // Экологические системы и приборы. 2015. № 2. С. 49–55.

84. Черноиван В.Н., Леонович С.Н., Черноиван Н.В. Эффективные технологии производства

работ по ликвидации не эксплуатируемых производственных объектов // Наука и техника. 2016. Т. 15. № 2. С. 95–106.

85. Zolotukhin S.N., Chigarev A.G., Abdulloev A.R. Designing and constructing foundations on a landslide slope // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463 (2). DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032088

86. Agrela F., Barbudo A., Ramírez A., Ayuso J., Carvajal M.D., Jiménez J.R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain // Resources, Conservation and Recycling. 2012. Vol. 58. Pp. 98–106. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.11.003

87. Jimenez J.R., Ayuso J., Agrela F., López M., Galvín A.P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads // Resources, Conservation and Recycling. 2012. Vol. 58. Pp. 88–97. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.10.012

88. Arulrajah A., Disfani M.M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 58. Pp. 245–257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025

89. Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base // Materiales de Construcción. 2011. Vol. 61. Pp. 289–302. DOI: 10.3989/mc.2010.54009

90. Zhang J., Gu F., Zhang Y. Use of building-related construction and demolition wastes in highway embankment: Laboratory and field evaluations // Journal of cleaner production. 2019. Vol. 230. Pp. 1051–1060. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.182

Поступила в редакцию 29 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 1 октября 2019 г.

Одобрена для публикации 30 января 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Александрович Колодяжный** — доктор технических наук, профессор, ректор; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14; Scopus: 57194518420; rector@vgasu.vrn.ru;

Сергей Николаевич Золотухин — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова, член Академии развития строительного комплекса; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14; Scopus: 57197812650, ORCID: 0000-002-113-9759; ser6812@yandex.ru;

Анатолий Александрович Абраменко — помощник ректора, начальник управления имуществом комплексом, ассистент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14; Scopus: 57197811950; abramenko_aa@mail.ru;

Екатерина Анатольевна Артемова — магистрант кафедры градостроительства; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14; SPIN-код: 8597-6650; rc-36@yandex.ru.

REFERENCES

1. Babenko G.V., Lukin M.V. Analysis of world tendencies and foreign experience of economic providing solution of tasks of renovation of buildings of city agglomerations. *Fundamental research*. 2017; 4-2:314-319. (rus.).
2. Drozhzhin R.A. Renovation of urban areas. *Proceedings of the all-Russian scientific and practical conference with international participation. Novokuznetsk, October 18-20, 2016*. Novokuznetsk, 2016; 307-310. (rus.).
3. Naletova A.S. Renovation of urban areas, built-up in 1950-1960-ies. *Best scientific article 2017: collection of articles IX International scientific and practical competition*. 2017; 271-273. (rus.).
4. Volchatova I.V., Statsenko Yu. Yu. Possibilities of secondary use of building materials within the program of renovation of houses. *Prospects of development of mining and metallurgical industry (Hosinski read — 2018): materials of the International scientific and practical conference. Irkutsk, November 29-December 01, 2018*. Irkutsk, IRNITU Publishing House, 2018; 280-285. (rus.).
5. Stavtsev E.A. The reasons for the renovation of industrial territories and the importance of this process in the formation of modern urban space. *Safe and comfortable city. Collection of scientific papers on the materials of the all-Russian scientific-practical conference. Oryol, September 27, 2018*. Oryol, Oryol State University named after I.S. Turgenev, 2018; 62-64. (rus.).
6. Moiseeva A.A., Chugunov A.V. Realization of renovation projects in the city of Voronezh to improve the efficiency of using the residential area. *Student and science*. 2018; 1:42-48. (rus.).
7. Korostin S.A. Stimulation of low-rise housing construction as a way to renovate housing policy of Russian regions. *Fundamental research*. 2015; 5-2:415-418. (rus.).
8. Zazulya V.S. Town-planning potential of “gentrification” of territories of the “grey belt” in modern conditions of Saint Petersburg. *Actual problems of architecture, urban planning and design: theory, practice, education. Proceedings of the International scientific conference. Volgograd, September 23–29, 2018*. Volgograd, VolgGTU, 2018; 165-169. (rus.).
9. Afanasiev K.S. Gentrification and re-industrialization in the urban development. *Vestnik of Pushkin Leningrad State University*. 2014; 6(2):48-60. (rus.).
10. Arlyapova P.A., Rodionova E.V. Gentrification and transformation of modern urban space (on the example of Russian cities). *Youth, science, technology: new ideas and perspectives (YST-2016). Proceedings of the III International scientific conference of students and young scientists. Tomsk, November 22–25, 2016*. Tomsk, Vol. state architect build University, 2016; 13-16. (rus.).
11. Huang B., Wang X., Kua H., Geng Y., Bleischwitz R., Ren J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 129:36-44. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.029
12. Bzhenikov A.A., Nesterova V.A. Methods of dismantling buildings and structures. *Days of student science : Collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture Moscow, March 12–16, 2018*. Moscow, 2018; 432-433. (rus.).
13. Muzakayev H.G., Ertuev A.R., Ladaria B.V., Artenyan T.R., Zharkov D.A. Analysis of reconstruction and dismantling of residential buildings. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2018; 7(96):905-908. (rus.).
14. Isupov I.A. Analysis of technologies of stripping of buildings explosion and by the “cut and take down”. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2017; 1:307-312. (rus.).
15. Knyazev A.A., Krasnoshchekova A.I., Timoshenko E.A. Features of dismantling of buildings. *Technique and technologies: ways of innovative development Collection of scientific papers of the 7th International scientific-practical conference. Kursk, June 29–30, 2018*. Kursk, 2018; 139-141. (rus.).
16. Konopleva A.A., Petrova T.A., Sekrij M.A. Features of dismantling of buildings and structures in urban areas. *Innovative development of regions: the potential of science and modern education : Proceedings of the National scientific and practical conference. Astrakhan, February 09, 2018*. Astrakhan, GAOU JSC VO “AGASU”, 2018; 68-74. (rus.).
17. Geldyev M.T., Arazov B.M. Technologies of demolition of buildings. *Youth and science: a step to success. Collection of scientific articles of the 3rd all-Russian scientific conference of perspective developments of young scientists. Kursk, March 21–22, 2019*. Kursk, University Book publ., 2019; 27-30. (rus.).
18. Galaeva N.L. The explosion method for demolition of buildings and structures in conditions of urban environment. *Science prospects*. 2019; 5(116):54-56. (rus.).
19. Velikanov N.L., Naumov V.A., Tarasov D.A. Use of destruction percussion at pulling down of building constructions. *KSTU NEWS*. 2011; 20:48-53. (rus.).
20. Kleemann F., Lederer J., Aschenbrenner P., Rechberger H., Fellner J. A method for determining buildings’ material composition prior to demolition. *Building Research and Information*. 2016; 44(1):51-62. DOI: 10.1080/09613218.2014.979029
21. Mihai F.-C. Construction and Demolition Waste in Romania: The Route from Illegal Dumping to Building Materials. *Sustainability*. 2019; 11(11). DOI: 10.3390/su11113179

22. Dobrosotskikh M.G., Potekhin I.A., Kim T.S., Kostina D.P. Organization of piecemeal disassembly of the building with reuse of building structures and materials. *Construction and real estate*. 2018; 1-1(2):123-128. (rus.).
23. Fachratov M.A., Sulejmanov Kh.A., Bolutin O.A. Features of concreting and dismantling of buildings within the element system. *The Innovations and Investments magazine*. 2018; 4:341-344. (rus.).
24. Jesus S., Maia C., Farinha C.B., de Brito J., Veiga R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*. 2019; 229. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116844
25. Jiménez J.R., Ayuso J., López M., Fernández J.M., De Brito J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*. 2013; 40:679-690. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036
26. Solís-Guzmán J., Marrero M., Montes-Delgado M.V., Ramírez-de-Arellano A. A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*. 2009; 29(9):2542-2548. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.05.009
27. Grigoriadis K., Whittaker M., Soutsos M., Sha W., Napolano L., Klinge A. et al. Improving the recycling rate of the construction industry. *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2019; 1. DOI: 10.18552/2019/IDSCMT5044
28. Chen J., Su Y., Si H., Chen J. Managerial areas of construction and demolition waste: a scientometric review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(11). DOI: 10.3390/ijerph15112350
29. Iacovidou E., Purnell P., Lim M.K. The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? *Journal of Environmental Management*. 2018; 216:214-223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.093
30. Rose T.M., Manley K., Agdas D. A conceptual framework to investigate the adoption of on-site waste management innovation in Australian building projects. *2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*. 2017; 1830-1837. DOI: 10.1109/PICMET.2016.7806745
31. Guignot S., Touzé S., Von der Weid F., Ménard Y., Villeneuve J. Recycling construction and demolition wastes as building materials: a life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*. 2015; 19(6):1030-1043. DOI: 10.1111/jiec.12262
32. Pittau F., Amato C., Cuffari S., Iannaccone G., Malighetti L.E. Environmental consequences of refurbishment vs. demolition and reconstruction: a comparative life cycle assessment of an Italian case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 296. DOI: 10.1088/1755-1315/296/1/012037
33. Islam R., Nazifa T.H., Yuniarto A., Uddin A.S.M.S., Salmiati S., Shahid S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*. 2019; 95:10-21. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.049
34. Letelier V., Henríquez-Jara B.I., Manosalva M., Moriconi G. Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials. *Waste Management*. 2019; 94:107-119. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.041
35. Pavlu T., Pesta J., Volf M., Lupíšek A. Catalogue of construction products with recycled content from construction and demolition waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 290. DOI: 10.1088/1755-1315/290/1/012025
36. Kianimehr M., Shourijeh P.T., Binesh S.M., Mohammadinia A., Arulrajah A. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*. 2019; 227:11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116792
37. Akhtar A., Sarmah A.K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:262-281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085
38. Cardoso R., Silva R.V., De Brito J., Dhir R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review. *Waste Management*. 2016; 49:131-145. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.12.021
39. Zolotukhin S.N. Opportunities for creating a regional cluster of reuse of construction waste. *Resource-energy-Efficient technologies in the construction complex of the region*. 2018; 10:209-212. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35191748>.
40. Zolotukhin S.N., Nasonova T.V., Potekhin I.A. Rational construction with reuse of construction materials, designs, products after demolition of buildings. *Resource-energy-Efficient technologies in the construction sector of the region*. 2018; 10:206-209. (rus.).
41. Zolotuhin S.N., Lobosok A.S. Reuse of building materials and use of waste production in minilevel construction. *Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materials of the interregional scientific-practical conference "High technologies in ecology"*. 2011; 1:63-66. (rus.).
42. Zolotuhin S.N., Goykalov A.N., Kudjiku T. Application of indirect reinforcing in external bearing walls of buildings and constructions executed in the form of a laying from small cellular-concrete blocks. *Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materials of the interregional scientific-practical conference "High technologies in ecology"*. 2012; 1:169-172. (rus.).
43. Shmelev G.D. Expert method of predicting the residual life building structures of their physical de-

rioration. *Building and reconstruction*. 2014; 3(53):31-39. (rus.).

44. Zolotuhin S.N., Zolotuhina M.S. The use of waste building materials in the design of a sports complex. *Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materials of the interregional scientific-practical conference "High technologies in ecology"*. 2011; 1:58-62. (rus.).

45. Sheffield H. Sweden's recycling is so revolutionary, the country has run out of rubbish. *Independent*. 2016. URL: <https://www.independent.co.uk/environment/sweden-s-recycling-is-so-revolutionary-the-country-has-run-out-of-rubbish-a7462976.html>

46. Zolotukhin C. *Rational construction*. URL: <https://www.youtube.com/channel/UCYGPk70gK-wN84pSlkQPR6dg>.

47. Kien T.T., Thanh L.T., Lu P.V. Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam. *The International Conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future, Hanoi*. 2013; 247-256.

48. Riosa F.C., Riosa F.C., Chonga W.K., Graua D. Design for disassembly and deconstruction — challenges and opportunities. *Procedia Engineering*. 2015; 118:1296-1304. DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.485

49. Nussholz J.L.K., Rasmussen F.N., Milios L. Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 141:308-316. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.036

50. Charytonowicz J., Skowroński M. Reuse of building materials. *Procedia Manufacturing*. 2015; 3:1633-1637. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.456

51. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 217:787-797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212

52. Johansson N., Corvellec H. Waste policies gone soft: An analysis of European and Swedish waste prevention plans. *Waste Management*. 2018; 77:322-332. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.015

53. Huuhka S., Kaasalainen T., Hakanen J. H., Lahdensivu J. Reusing concrete panels from buildings for building: Potential in Finnish 1970s mass housing. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015; 101:105-121. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.05.017

54. Arm M., Wik O., Engelsen C.J., Erlandsson M., Hjelmar O., Wahlström M. How does the European recovery target for construction & demolition waste affect resource management? *Waste and Biomass Valorization*. 2017; 8:1491-1504. DOI: 10.1007/s12649-016-9661-7

55. Yazdanbakhsh A. A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies. *Waste*

Management. 2018; 77:401-412. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.024

56. Blengini G.A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy. *Building and Environment*. 2009; 44(2):319-330. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.03.007

57. Bribián I.Z., Capilla A.V., Usón A.A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*. 2011; 46(5):1133-1140. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002

58. Wu H., Zuo J., Zillante G., Wang J., Yuan H. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 240. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118163

59. Eberhardt L.C.M., Birgisdottir H., Birkved M. Potential of circular economy in sustainable buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/9/092051

60. Aras F. Monitoring the dynamic properties of a nine-story reinforced concrete building during its demolition. *Structural control & Health Monitoring*. 2019; 26(11). DOI: 10.1002/stc.2456

61. Bukharova O. Sergey Stepashin, head of the Supervisory Board of the housing reform assistance Fund, talks about the resettlement program. *Russian newspaper*. 2018; 7724(261). (rus.).

62. Yu B., Wang J., Li J., Zhang J., Lai Y., Xu X. Prediction of large-scale demolition waste generation during urban renewal: A hybrid trilogy method. *Waste Management*. 2019; 89:1-9. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.063

63. Hossain M.U., Ng S.T. Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 142:10-23. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.010

64. Sakai S., Poudel R., Asari M., Kirikawa T. Disaster waste management after the 2016 Kumamoto Earthquake: A mini-review of earthquake waste management and the Kumamoto experience. *Waste Management and Research*. 2019; 37:247-260. DOI: 10.1177/0734242X18815948

65. Rosado L.P., Vitale P., Penteado C.S.G., Arena U. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste Management*. 2019; 85:477-489. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.011

66. Hu K., Chen Y., Naz F., Zeng C., Cao S. Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. *Waste Management*. 2019; 85:396-404. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.007

67. Nussholz J.L.K., Nygaard Rasmussen F., Milios L. Circular building materials: Carbon saving poten-

tial and the role of business model innovation and public policy. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 141:308-316. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.036

68. Gurfov A.O. The analysis of foreign experience of recycling construction waste. *Collection of articles II International scientific and practical competition*. 2016; 18-22. (rus.).

69. Gajkalov A.N. Potapenko E.A. More efficiently of fencing cellular concrete in wall structures civil buildings. *Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materials of the interregional scientific-practical conference "High technologies in ecology"*. Penza, Science and Enlightenment, 2012; 1:58-61. (rus.).

70. Budnik M.S., Karpova T.S. Dismantling of buildings and secondary use of materials. *Materials of the 57th student scientific and technical conference of PNU Institute of civil engineering. Khabarovsk, April 17–27, 2017. Khabarovsk*, 2017; 48-51. (rus.).

71. Bakhtina A.A., Ohlopkova T.V. The use of recycled materials for a green future. *Modern research and development*. 2018; 3:4(21):29-30. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36324318_86423318.pdf (rus.).

72. Zolotukhin S.N., Lugansky V.I., Nazarenko N.G., Demidenko A.I., Makarychev K.V., Borisova M.I. et al. Reuse of reinforced concrete building elements in foundation structures. *Chemistry, physics and mechanics of materials*. 2019; 1(20):72-91. (rus.).

73. Barsuk E.A. Secondary use of building materials in the black earth region. *The future of science 2019. Collection of scientific articles of the 7th international youth scientific conference. Kursk, April 25–26, 2019. Kursk*, 2019; 11-13. (rus.).

74. Slautina K.A., Zhukov M.M. Reuse and recycling of building materials, for example concrete with a light filler. *Technical Sciences: problems and solutions. The proceedings of the XXIII international scientific-practical conference. Moscow, May 21, 2019. Moscow, Internauka publ.*, 2019; 100-103. (rus.).

75. Andrienko V.V., Galaeva D.H. Application area of waste building materials. *Safe and comfortable city. Collection of scientific papers on the materials of the I international scientific-practical conference of young scientists. Oryol, September 29, 2017. Oryol*, 2017; 179-182. (rus.).

76. Lukashevich D.S., Turov A.V. Building materials based on industrial wastes. *Russian cities: problems of construction, engineering, landscaping and ecology Collection of articles XXI International scientific and practical conference. Penza, April 16-17, 2019 Penza, RIO PGAU*, 2019; 70-72. (rus.).

77. Lukash A.A., Lukutsova N.P. Effective building materials from industrial waste for housing. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2017; 2:26-37. (rus.).

78. Tikhonova I.N., Lega S.H. Environmental problems of education and utilization of msw and building wastes in the region of caucasus Mineralnye vody region. *On-line Scientific & Educational Bulletin "Health & education millennium"*. 2017; 19(7):49-53. DOI: 10.26787/nydha-2226-7417-2017-19-7-49-53 (rus.).

79. Kudryashova T.V., Balanina A.A., Svezhentseva M.A. Problems of utilization of building wastes and prospects of their solution. *Actual problems and prospects of social and economic development of modern Russia. Collection of articles of the all-Russian scientific and practical conference*. 2017; 57-61. (rus.).

80. Krygina A.M., Krygina N.M. On the issue of housing real estate reproduction on the basis of recycling of construction industry waste. *Russian Journal of Housing Research*. 2018; 5(3):353-366. (rus.).

81. Bodenko E.M., Perepechenov A.M. Geoecological assessment of the method of collection and removal of construction waste in the city in preparation for demolition. *Natural and technical Sciences*. 2018; 5(119):143-148. (rus.).

82. Lyutov V.N., Baranovskaya M.S. Features and prospects of modern technology of recycling of reinforced concrete products in housing construction. *Polzunovsky almanac*. 2016; 1:139-142. (rus.).

83. Lunev G.G. Assessment of economic effect of processing of constructional secondary construction resources at the enterprises. *Ecological systems and devices*. 2015; 2:49-55. (rus.).

84. Chernoiivan V.N., Leonovich S.N., Chernoiivan N.V. High performance technologies for liquidation of non-operational production facilities. *Science & Technique*. 2016; 15(2):95-106. (rus.).

85. Zolotukhin S.N., Chigarev A.G., Abdulloev A.R. Designing and constructing foundations on a landslide slope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463(2). DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032088

86. Agrela F., Barbudo A., Ramírez A., Ayuso J., Carvajal M.D., Jiménez J.R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012; 58:98-106. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.11.003

87. Jimenez J.R., Ayuso J., Agrela F., López M., Galvín A.P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012; 58:88-97. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.10.012

88. Arulrajah A., Disfani M.M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*. 2014; 58:245-257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025

89. Jiménez J.R., Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*. 2011; 61:289-302. DOI: 10.3989/mc.2010.54009

90. Zhang J., Gu F., Zhang Y. Use of building-related construction and demolition wastes in highway embankment: Laboratory and field evaluations. *Journal of cleaner production*. 2019; 230:1051-1060. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.182

Received August 29, 2019.

Adopted in a revised form on October 1, 2019.

Approved for publication on January 30, 2020.

B I O N O T E S: **Sergey A. Kolodyazhny** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 14 Moskovsky prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation; Scopus: 57194518420; rector@vgasu.vrn.ru;

Sergei N. Zolotukhin — Associate Professor, Professor, Professor of the Department of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu.M. Borisov, member Of the Academy of building complex development; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 14 Moskovsky prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation; Scopus: 57197812650, ORCID: 0000-002-113-9759; ser6812@yandex.ru;

Anatoly A. Abramenko — Assistant Rector, Head of Property Management, Assistant of the Department of Building Constructions, Bases and Foundations named after Professor Yu. M. Borisov; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 14 Moskovsky prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation; Scopus: 57197811950; abramenko_aa@mail.ru;

Yekaterina A. Artemova — Master's student of the Department of Urban Planning; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 14 Moskovsky Prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation; SPIN-code: 8597-6650; rc-36@yandex.ru.