

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.4.036

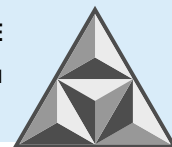
# Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов

**А.А. Баруздин, Л.В. Закревская**

**Александр Андреевич Баруздин, Любовь Владимировна Закревская**

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

*baruzdin98@bk.ru, lvzak@mail.ru*

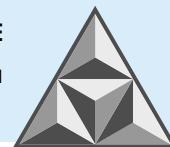


*Приведена классификация отходов строительства и оценена возможность их использования с целью получения новых строительных материалов. Представлены примеры получения композитов на основе отходов стекло- и кирпичного боя, железобетонного лома, гипсокартона, древесины, асбестоцемента, поливинилхлорида и сшитого полиэтилена. Анализ литературных источников выявил, что производство строительных материалов и изделий на основе отходов строительства является перспективным направлением развития производства, позволяющим снизить расходы, сохранить природные ресурсы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. К отходам, рециклинг которых слабо изучен или затруднен, отнесены отходы сшитого полиэтилена (изоляция кабелей и трубопроводов). Приведены результаты исследований, направленные на синтез нефтестойких бетонов на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичной крошки. Показаны перспективы использования сшитого полиэтилена в качестве заполнителя для бетонов.*

**Ключевые слова:** рециклинг, строительные отходы, кирпичный бой, железобетонный лом, древесина, гипсокартон, полиэтилен

**Для цитирования:**

Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 29-54. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

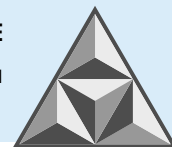
# Prospects of recycling in construction in order to create innovative composite materials

**A.A. Baruzdin, L.V. Zakrevskaya**

**Aleksandr A. Baruzdin, Lyubov V. Zakrevskaya**

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

*baruzdin98@bk.ru, lvzak@mail.ru*

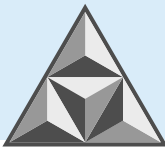


*The article classifies construction wastes and assesses the possibility of using them to produce new construction materials. The authors present examples of obtaining composites on the basis of glass and brick waste, reinforced concrete debris, gypsum plasterboard, drywall, wood, asbestos cement, polyvinyl chloride, and cross-linked polyethylene. The analysis of literature sources reveals the manufacturing of building materials and products on the basis of construction waste. Their using is a promising direction of production development, allowing us to reduce costs, conserve natural resources, and minimize the negative impact on the environment. The wastes of cross-linked polyethylene (insulation of cables and pipelines) belong to the wastes, recycling of which is poorly studied or complicated. The article also provides the results of research aimed at the synthesis of oil-resistant concrete on the basis of cross-linked polyethylene waste and crushed bricks, indicating the prospects of using cross-linked polyethylene as an aggregate for the production of concrete.*

**Key words:** recycling, construction waste, crushed bricks, reinforced concrete debris, wood, drywall, polyethylene

**For citation:**

Baruzdin, A.A. & Zakrevskaya, L.V. (2023) Prospects of recycling in construction to produce innovative composite materials, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 29-54 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом возрастает количество возводимых, а также подлежащих разборке и сносу зданий и сооружений. Эти процессы сопровождаются образованием значительного количества техногенных отходов, которые занимают огромные площади для хранения и негативно влияют на экологическую обстановку в стране и в мире.

В октябре 2022 г. Министерство строительства и коммунального хозяйства Российской Федерации утвердило паспорт программы «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022-2030 годы». Целью введения документа являлось увеличение массы отходов, вовлекаемых в хозяйственный оборот, снижение количества отходов строительства, отправляемых на захоронение, формирование комплексного подхода к обращению с отходами строительства на всех этапах жизненного цикла.

Цель настоящего исследования – анализ известных из литературных источников способов переработки отходов и изучение возможности их повторного использования в составе строительных материалов.

На рис. 1 представлены основные способы утилизации строительных отходов.

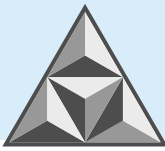


**Рис. 1.** Способы утилизации строительных отходов

**Fig. 1.** Methods of the construction waste disposal

В Российской Федерации на сегодняшний день большая часть строительных отходов подлежит сжиганию или захоронению. К недостаткам таких способов утилизации можно отнести: высокие затраты на строительство мусоросжигательных заводов; негативное влияние на человека и окружающую среду вследствие загрязнения и отравления почвы, воды и атмосферы; организация полигонов для хранения отходов.

Этих недостатков лишен рециклинг отходов. Он подразумевает переработку отходов для их повторного использования в хозяйстве и создания новых материалов и изделий.



К основным его преимуществам можно отнести: снижение стоимости производства материалов и изделий, негативного воздействия на окружающую среду [1-4], сохранение натуральных природных сырьевых ресурсов и снижение

Впервые отходы строительства были применены для возведения новых зданий после второй мировой войны в Германии, однако в мире данная практика получила распространение совсем недавно. В некоторых государствах практически отсутствуют полигоны для захоронения, а доля переработки строительных отходов составляет от 50 до 90%. В России, несмотря на значительный опыт работы с техногенными отходами, такие технологии находятся в стадии развития [5].

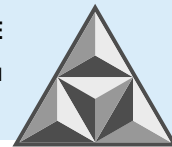
Основными отходами, образующимися в процессе строительства, разборки и сноса зданий и сооружений, являются кирпичный и стеклянный бой, железобетонный лом, лом асфальта, древесина, пластмассы, асбестовый шифер, минераловатный утеплитель, рубероид, обрезки кабелей и труб, гипсокартон, цементно-известковые и гипсовые растворы, лакокрасочные материалы, грунт, санитарно-технический фаянс, загрязненная бумажная, металлическая и пластиковая тара.

На рис. 2 представлены основные виды строительных отходов.



**Рис. 2.** Виды строительных отходов: *a* – кирпичный бой; *б* – бетонный лом; *в* – отходы древесины; *г* – гипсовые отходы (гипсокартон); *д* – асбестоцементные отходы; *е* – отходы ПВХ; *ж* – стеклобой; *з* – отходы шитого полиэтилена

**Fig. 2.** Types of construction waste: *a* – crushed bricks; *b* – concrete debris; *c* – wood waste; *d* – gypsum waste (drywall); *e* – asbestos cement waste; *f* – PVC waste; *g* – glass waste; *h* – waste of cross-linked polyethylene



## РЕЦИКЛИНГ КИРПИЧНОГО БОЯ И БЕТОННОГО ЛОМА

Распространенными отходами являются кирпичный бой и бетонный лом. Они накоплены в больших объемах, и при использовании их в качестве добавок, наполнителей и заполнителей в составе бетонах и других композиционных материалов возникает возможность положительно влиять на свойства композиционных материалов.

Для измельчения кирпичного боя и железобетонного лома необходимо использовать стационарные, сборно-разборные и мобильные дробильные и сортировочные установки, а также мельницы.

Особенностью продуктов переработки кирпичного боя является то, что они имеют ту же структуру, что и исходный материал – кирпич, обладают аналогичной прочностью и пористостью. Зерна заполнителя из дробленого кирпичного боя состоят из фрагментов кирпича и растворной части, доля которой может составлять до 15-20% [6-13].

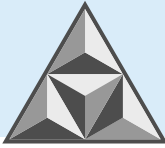
Кроме того, тонкомолотый порошок, изготовленный из глиняного кирпича, обладает пуццолановой активностью. Это обусловлено переходом кристаллических структур силикатов глины в аморфные соединения при обжиге глин в интервале 973-1473 К. Тонкомолотый кирпич содержит морфологические частицы, представляющие полевошпат и кварц, что обеспечивает пуццолановую активность при взаимодействии с известью при комнатной температуре [14-16].

Выявлено, что в тонкомолотом порошке на основе боя глиняного кирпича содержание оксидов кремния, магния и железа составляет 78%, в результате чего порошок обладает пуццолановой активностью. Смесь гидроксида кальция (извести) с молотым боем кирпича, затворенная водой, впоследствии при твердении способна образовывать гидросиликаты и гидроалюминаты кальция в условиях: рН раствора = 12.5; температура 298 К.

Первичными продуктами дробления бетонного лома являются щебень различных фракций и отсеб дробления бетонного лома, который можно использовать в качестве микронаполнителя в комплексных вяжущих. Особенностью щебня из бетонного лома является то, что его гранулы имеют частичную или сплошную оболочку из цементного раствора. Эта оболочка обладает пористостью, что приводит к повышенному водопоглощению заполнителя [17]. При получении щебня из бетона путем дробления происходит разрушение кусков бетона с образованием новых физико-химических активных центров на поверхности цементного камня, негидратированная часть которого может подвергаться дальнейшей гидратации.

Отходы бетонного лома, как и кирпичного боя, обладают повышенным водопоглощением, что подразумевает целесообразность их применения совместно с пластификаторами. Повышенная водопотребность данных заполнителей влияет на процесс структурообразования. Вследствие перераспределения воды между твердой, жидкой и газообразной фазами изменяются реологические свойства бетонной смеси. При введении в бетонную смесь такой заполнитель сначала поглощает жидкую фазу, а затем в процессе образования цементного камня ее отдает. Происходит отсасывание воды из пор заполнителя в твердеющий цементный камень, способствующее образованию более плотной структуры [6-13, 17].

Используя дробленый кирпичный бой в качестве заполнителя совместно с пластификаторами, можно получать бетоны класса В20-В30 с меньшей плотностью, однако без существенного снижения прочности [6-8].



На основе мелкодисперсной фракции кирпичного боя можно изготавливать ячеистые керамобетоны класса по прочности В15, плотностью  $700 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , с показателем теплопроводности, не превышающим  $0.2 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$  [11].

Для получения на основе отходов кирпичного боя бетона наилучшего качества необходимо ограничивать уровень замещения крупнозернистого и мелкозернистого заполнителя на 25 и 50% соответственно. При этом применение заполнителя из дробленого кирпичного боя может снизить себестоимость бетона до 35%.

На основе боя керамического кирпича возможно изготовление керамобетонных блоков класса по прочности В15, по морозостойкости – F35-F50, с водопоглощением менее 7.5% и сниженной себестоимостью [9].

Используя песок из керамического кирпичного боя и портландцемент, можно получать штукатурные смеси, не уступающие по характеристикам традиционным. Растворы с применением песка из данных отходов имеют сопоставимую с традиционными растворами прочность, но более высокие показатели по водоудерживающей способности, раскраиваемости и теплопроводности [18].

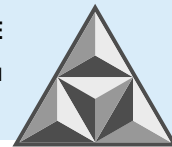
В [19] исследовалось влияние введения в цементные растворы мелкой фракции кирпичной крошки. Отмечается, что при введении 5-10% кирпичного заполнителя прочность возрастает до 60 и 75% соответственно, снижается коэффициент водопоглощения. У раствора с добавлением 10% частиц кирпичного порошка водоудерживающая способность выше, чем у эталонного раствора, что может препятствовать всасыванию воды оштукатуренной поверхностью, способствовать увеличению прочности и адгезионной способности. Указывается, что замена натуральных заполнителей на переработанные приводит к незначительному увеличению усадки. В данном исследовании добавление 10% кирпичного порошка в раствор взамен песка позволило увеличить адгезионную прочность на 30%; также зафиксировано снижение паропроницаемости и водопроницаемости.

Возможно использовать мелкодисперсный кирпичный порошок для производства кирпича марок М125, М150 и элементов дорожного мощения при содержании отходов кирпичного боя до 30 и 20% соответственно [20].

Молотый кирпичный бой с удельной поверхностью  $3200-5500 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$  можно использовать в цементных композициях для экономии цемента и снижения выбросов углекислого газа в атмосферу. При этом оптимальная дозировка тонкомолотого кирпичного боя составляет 20% от массы вяжущего, а дополнительно рекомендуется использовать щелочные водные растворы для активации и повышения прочностных характеристик композиций [14]. Авторы [15-16] отмечают, что на механические свойства бетонов с добавлением кирпично-глиняного порошка сильно влияет отношение В/Ц. Наибольшая прочность при сжатии достигается при  $\text{В/Ц} = 0.26$ , размере частиц тонкомолотого кирпича 0.06 мм, содержании песка 33% и коэффициенте замещения цемента на кирпичный порошок 25%. Также добавление тонкомолотого кирпичного порошка улучшает структуру композита; при этом уменьшается количество и размер пор. Дополнительные гидраты, образующиеся в ходе пуццолановой реакции, увеличивают плотность матрицы.

Авторами данной работы на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых проведено исследование, направленное на синтез строительных растворов, пригодных для использования в качестве отделочных, ремонтных и реставрационных целей. Для синтеза растворов использовали отходы гашеной извести и диатомита (отходы горной добычи), тонкомолотые отходы кирпичного боя, гипс, обожженную глину и кварцевый песок. По результатам исследования было установлено,





что добавление в состав тонкомолотой кирпичной крошки повышает плотность и равномерность структуры и снижает количество пор и пустот, а также положительно влияет на прочностные характеристики известкового раствора. Максимальная прочность образцов при содержании извести 35% и кирпичной крошки 19% (по массе) достигала 6.4 МПа; при этом плотность всех образцов варьировалась в диапазоне 1200-1300 кг·м<sup>-3</sup>.

В табл. 1 приведены синтезированные составы и их прочностные характеристики.

**Таблица 1.** Составы синтезированных композитов

**Table 1.** Compositions of synthesized composites

Марка состава	Компоненты, % мас.							Свойства	
	Диатомит	Гипс	Гашеная известь	Кварцевый песок	Глина	Кирпичная крошка	Вода	Плотность $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа
1	5	8	35	0	5	19	28	1276	6.40
2	5	8	35	3	5	16	28	1259	5.25
3	5	8	25	5	5	24	28	1293	4.58

В то же время дробленый бетонный лом и отсеvy его дробления также можно применять в качестве вторичного заполнителя и микрозаполнителя в бетонных смесях.

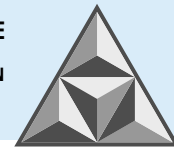
Авторами [21] проведено исследование свойств отсева бетонного лома в качестве активного микрозаполнителя в комплексном вяжущем. Установлено, что помол отсева дробления бетонного лома позволяет включать их в процесс твердения композита. Это объясняется наличием негидратировавших зерен портландцемента, которые при помоле «пробуждаются», а также наличием реакционноспособных карбонатов.

Пористость цементного камня при замещении части цемента молотым отсевом дробления бетонного лома снижается почти в два раза по сравнению с обычным портландцементом. Снижается количество и размер пор. Следовательно, данные бетоны обладают повышенной стойкостью и водонепроницаемостью.

Возможность применения дробленого бетонного лома в качестве заполнителя исследуется с середины XX века. Однако в СССР такие заполнители применялись сравнительно редко, что связано с отсутствием заинтересованности в экономии сырьевых ресурсов и несовершенством технологий фракционирования вторичного щебня. На данный момент применение таких отходов находится в фазе популяризации. Использование вторичного заполнителя из бетонного лома имеет перспективы: энергозатраты при производстве обычного щебня в восемь раз выше, чем таковые при производстве щебня из бетона. В результате использования вторичного щебня можно на 15–30% сократить использование природных заполнителей, а себестоимость бетона снизить на 25% [22].

В [22] отмечается, что бетон на основе заполнителей из бетонного лома относится к легким и имеет среднюю плотность 1840-1940 кг·м<sup>-3</sup> и теплопроводность 0.75-0.85 Вт·(м·К)<sup>-1</sup>. Бетоны с использованием таких заполнителей можно применять для изготовления широкого спектра изделий и конструкций. В ходе исследования [22] были изготовлены бетонные фасадные и тротуарные плиты, по своим эксплуатационным характеристикам удовлетворяющие современным нормам и стандартам. Для утилизации мелкой и пылевидной фракции отходов дробления бетона в качестве мелкого заполнителя предложена технология неавтоклавнога газобетона. Физико-механические показатели такого бетона удовлетворяют требованиям соответствующего государственного стандарта.

На основе заполнителей из бетонного лома можно получать бетоны распространенных классов по прочности В15-В30 и высокопрочные бетоны классов выше В70. При изготовлении



бетонов более низких классов (например, В15) набор прочности происходит быстрее, чем у бетонов на природных заполнителях [23].

Авторы [24] занимались разработкой мелкозернистых бетонов с использованием комбинированного заполнителя, состоящего из песчаной и мелкой щебеночной фракции отсева бетонного лома и природного песка. Они подтвердили целесообразность использования отсевов дробления бетонного лома для оптимизации гранулометрического состава мелкого заполнителя. Заполнитель из лома бетона является активным участником процесса твердения.

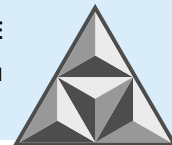
В [25] были проведены исследования составов бетонов с использованием заполнителей на основе отходов бетонного лома Ирака. Выявлено, что использование данных отходов в качестве наполнителя цементного вяжущего при замене до 20% портландцемента позволяет улучшить прочность материалов на сжатие, что происходит благодаря уплотнению структуры продуктами гидратации бетонных отходов, активированных в ходе измельчения.

### РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ГИПСА (ГИПСОКАРТОНА)

Гипсовые отходы, как и другие виды строительных отходов, подразделяются: отходы производства; отходы, возникающие во время строительства; отходы от сноса зданий. Отходы строительства и сноса являются сложными для переработки, так как при этом гипс часто смешивается с другими строительными материалами и эффективность его переработки снижается. При сборе отходов гипсокартона необходимо производить сортировку путем отделения от бумаги и металла. Отходы гипсокартона можно собирать и сортировать на месте, а после переработки, которая подразумевает нагрев отходов для дегидратации гипсового камня, использовать совместно с натуральным сырьем для приготовления новых гипсокартонных плит, штукатурки и др.

В [26] исследованы свойства вторичных гипсовых вяжущих, полученных из четырех типов отходов: гипсокартон с пропиткой; гипсокартон огнестойкий; гипсокартон стандартный; разрушенная гипсовая монолитная стена. Гипсовые отходы обрабатывали в дробилке и измельчали для исследований. Результаты исследования показали, что все четыре типа гипсовых отходов пригодны для вторичной переработки. Содержание гипса во вторичном связующем может варьироваться от 38 до 92%. В нем были обнаружены минеральные заполнители, а также древесные и стеклянные волокна. Оптимальный режим обработки для получения полугидрата гипса составляет 4 ч при температуре 403 К. Образцы имели прочность 0.4-1.5 МПа в возрасте 2 ч и 1.0-3.1 в возрасте 14 сут. Данное исследование доказывает целесообразность применения гипсовых отходов совместно с натуральным гипсовым вяжущим.

В [27] предлагается использовать переработанный гипсовый порошок в качестве частичной замены цемента в растворах, причем совместно с добавкой золы-уноса. Замена цемента переработанным гипсовым порошком дает последовательное снижение веса и прочности на сжатие. Однако при добавлении золы-уноса в смесь прочность на сжатие увеличивается, особенно на поздних сроках. Установлено, что при совместной замене цемента на переработанный гипсовый порошок и золу-унос можно получать цементно-песчаный раствор, который на поздних сроках твердения (56 сут.) имеет прочность только на 6% ниже по сравнению с контрольным образцом.



## РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ

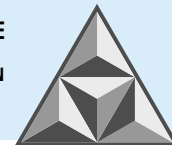
В России находится до 50% мирового запаса древесины, заготовка, обработка и использование которой сопровождаются образованием большого количества отходов. Рециклинг древесных отходов имеет большое экологическое и экономическое значение. С одной стороны, он позволяет производить конструкционные, теплоизоляционные и отделочные материалы с требуемыми эксплуатационными свойствами, с другой – позволяет существенно сократить объемы отходов на полигонах страны.

Древесные строительные отходы можно разделить на твердые или кусковые (обрезки пиломатериалов, досок и т.д.) и мягкие (стружка, опилки, древесная пыль). Наиболее ценными являются твердые отходы, так как из них можно получать разнообразную мелкую пилопродукцию. Последнюю используют в производстве древесноволокнистых (ДВП), древесностружечных (ДСП) и цементно-стружечных плит (ЦСП), арболита, фибролита, ксилолита, опилкобетона, гипсоопилочных блоков, гипсоволокнистых плит. Меньшей ценностью обладают мягкие отходы, варианты использования которых ограничены ввиду их формы и размера [28].

В строительстве широкое применение нашли древесно-цементные композиты – арболит, фибролит и др. Арболит – разновидность легкого бетона на основе минерального вяжущего (обычно портландцемента), органического заполнителя (дробленых отходов древесины), химических добавок и воды. Согласно ГОСТ 19222-2019, изделия из арболита обладают плотностью 500-1000 кг·м<sup>-3</sup>, прочностью на сжатие 1.5–5.0 МПа и теплопроводностью 0.070-0.300 Вт·(м·К)<sup>-1</sup> [29]. Арболитовые изделия используют в строительстве в виде блоков, панелей, плит покрытий и перекрытий, усиленных несущей основой, пола, перегородок, звуко- и теплоизоляционных конструкций.

Другим композитом на основе отходов древесины являются цементно-стружечные плиты. Способ изготовления таких плит открыт в США в 30-х годах XX столетия. В России эти плиты изготавливают с 80-х годов ушедшего века. Согласно ГОСТ 26816-2016 [30], цементно-стружечные плиты подразделяют на два класса: ЦСП-1 и ЦСП-2. Плотность плит составляет от 1100 до 1400 кг·м<sup>-3</sup>, предел прочности на сжатие – от 7 до 12 МПа, водопоглощение – до 16%. Также цементно-стружечные плиты относят к группе трудногораемых материалов (пламя по поверхности не распространяется); предел их огнестойкости составляет 50 мин. ЦСП используют для внутренней и внешней обшивки стен, в качестве несъемной опалубки как основу для пола, как настил под кровлю, в виде подоконника.

Фибролит – строительный материал, представляющий собой спрессованную и затвердевшую смесь из специально приготовленной древесной стружки (древесной шерсти), минерального вяжущего, химических добавок и воды. Фибролит является долговечным материалом (в случае защиты от климатических воздействий), трудногораемым и биостойким. Плотность фибролита составляет 250-500 кг·м<sup>-3</sup>, теплопроводность – 0.07-0.09 Вт·(м·К)<sup>-1</sup>, водопоглощение по массе – 35-45%. Чем больше плотность фибролитовой плиты, тем выше ее прочность (при изгибе достигает 1.0-1.3 МПа). Фибролитовые плиты низкой плотности (250-300 кг·м<sup>-3</sup>) используют для утепления стен, совмещенных кровель, карнизных панелей, вентиляционных каналов, а также в целях звукоизоляции кирпичной кладки. Теплоизоляционно-конструкционный фибролит плотностью 400-500 кг·м<sup>-3</sup> применяют для устройства перегородок, в качестве заполнителя древесного каркаса стен. Если его используют в качестве стенового материала, во избежание намокания и продувания необходимо осуществлять оштукатуривание. В частях зданий,



находящихся в условиях повышенной влажности, его применять не следует. Также фибролит используют в качестве несъемной опалубки.

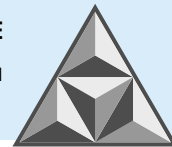
Ксилолит – строительный материал, состоящий из смеси магнезиального вяжущего, органического целлюлозного заполнителя (древесные опилки или другие измельченные целлюлозосодержащие частицы растительного происхождения) с добавлением тонкодисперсионных минеральных веществ (талька, асбеста, мраморной муки) и щелочестойких пигментов. Данный материал может быть прессованным или свободно формованным. Ксилолит достаточно стоек к пламени (не загорается, а лишь медленно обугливается), обладает низкой теплопроводностью  $0.08-0.26 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ , плотностью  $1000-1500 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , прочностью на сжатие (в прессованном виде) до 85 МПа, низким водопоглощением (до 3.8%), стойкостью к кислотам, плесени, морозу, сырости, жаре и сопротивлением к истиранию. Благодаря высокой прочности и незначительному истиранию из ксилолита делают полы на текстильных и прядильных фабриках, в пищевых, винодельческих и консервных производствах, помещениях с интенсивным движением – вестибюлях клубов, кинотеатров, столовых, в коридорах школ, детских садов, больниц и т.д. Особо эффективно применение ксилолитовых полов во взрывоопасных помещениях, где необходимо иметь неискрящие полы.

Опилкобетон – конструкционно-теплоизоляционный легкий бетон, в котором в качестве заполнителя используются древесные опилки, а в качестве вяжущего – цемент и известь. Плотность опилкобетона варьируется от 500 до 800  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , прочность при сжатии составляет 0.5-3.5 МПа, теплопроводность –  $0.07-0.18 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ , водопоглощение – 40–85%. По санитарно-гигиеническим показателям опилкобетон считается лучшим строительным материалом из всех «бетонных изделий», а по теплозащитным качествам он превосходит керамический кирпич. Множество воздушных пор, образующихся в опилкобетоне, и входящие в его состав деревянные опилки позволяют стенам из опилкобетона надежно сохранять тепло в доме, обеспечивая при этом естественную вентиляцию и поддерживая нормальную влажность в помещении. Главный недостаток данного материала – высокая способность впитывать грунтовую и атмосферную влагу. Поэтому при возведении строений из опилкобетона обязательно принимают защитные меры, позволяющие сохранить стены сухими.

Из отходов древесины изготавливают также гипсоопилочные блоки и гипсоволокнистые плиты. В качестве сырья для таких материалов используют щепу, опилки и гипс. Плотность гипсоопилочных блоков составляет  $650-850 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , предел прочности при сжатии – 2.0-3.5 МПа, теплопроводность –  $0.233-0.279 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ . Что касается гипсоволокнистых плит, их плотность не превышает  $1200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , предел прочности при изгибе – 6-8 МПа, а при сжатии – 22-28 МПа. Гипсоопилочные блоки применяют при устройстве несущих и самонесущих стен в жилых и общественных зданиях с влажностью не более 60%, а гипсоволокнистые плиты – для внутренней отделки зданий в качестве сухой штукатурки, устройства пола и перегородок с высокими звукоизоляционными показателями.

## РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОБОЯ

Стеклобой образуется в процессе строительства и сноса зданий и сооружений, а также существует в виде твердых бытовых отходов. В общей сложности в России на 1 млн. человек образуется 60-100 тыс. т стеклобоя в год, и при хранении отходов на полигонах такого количества стеклобоя выделяется 828-1380 кг щелочи, что приводит к деградации почвы [31]. В то же время использование отходов стеклобоя в производстве строительных материалов



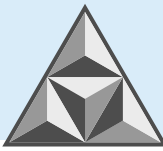
позволяет сохранять и экономить природные ресурсы. Таким образом, переработка данного отхода играет важную экологическую и экономическую роль в современной промышленности.

Отходы стеклобоя активно используют в стекольной (варка стекла, производство стекловолокна и стеклянных шариков) и строительной промышленности (изготовление бетона, облицовочной плитки, строительных кирпичей, пеностекла), а также при укладке дорожных покрытий (асфальтобетон с измельченным стеклом, гласасфальт, герметизирующие составы, нижние слои дорожного покрытия) [32].

По данным [32], при варке листового стекла стеклобой не применяют, но используют при изготовлении темно-зеленого полубелого бутылочного стекла, а также стекла консервной тары. Его можно применять для изготовления стекловолокна (армирование битумных гидроизоляционных покрытий подземных газо- и нефтепроводов) и стеклорубероида (срок службы выше обычного), наружных покрытий горячих трубопроводов, получения стеклопластиков и др. Одним из направлений переработки стеклобоя является производство стеклянных шариков (изготовление теле- и стереоскопических киноэкранов, деталей микрооптики, применение в качестве наполнителей для пластмасс, мелющих тел и т.д). Стеклобой применяют для изготовления строительных кирпичей. Металлургическая лаборатория в Таскалусе (США) провела исследования и изготовила полнотелые кирпичи из массы, содержащей 70% стеклобоя, глину, 1%  $\text{BaCO}_3$  для устранения высолов и 1% лигносульфонатной связки для повышения прочности сырца. После увлажнения до 5% масса перемешивалась в бетономешалке. Кирпичи прессовали при давлении  $2401 \cdot 10^4$  Па ( $245 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2$ ). Сырец сушили в течение 15 ч при температуре  $100^\circ\text{C}$  и обжигали в течение 24 ч при температуре  $950^\circ\text{C}$  в газовой челночной печи. Полученные кирпичи имели достаточно высокие характеристики по сравнению с нормативными требованиями Американского сообщества: предел прочности на сжатие составил 56.4 МПа, а водопоглощение – 9.8%. Эти кирпичи можно окрашивать с помощью добавок оксидов железа, кобальта и хромового ангидрида путем введения в шихту перед перемешиванием. В Дании также запатентован способ изготовления силикатных кирпичей с использованием стеклобоя, о чем говорится в [32]. В отличие от обычных силикатных кирпичей, их цвет не зависит от погодных условий. Перед обжигом они могут быть покрыты эмалевой фриттой, окрашивающей изделия в любой желаемый цвет

Другое направление применения стеклобоя в производстве строительных изделий – производство декоративных облицовочных плиток. В [33] описан способ изготовления материала, который авторы называют «поростеклокерамит». Материал пригоден для изготовления плиток, блоков и гранул. Поростеклокерамит получают путем полусухого прессования сырьевой композиции, состоящей на 75-80% из стекольного боя, 15-20% глины и колеманита. Готовые изделия имеют микропористую равномерную структуру, низкое водопоглощение и хорошие прочностные показатели. Поверхность плиток – гладкая оплавленная, практически без пор. Цвет готовых плиток изменяется в зависимости от вида и количества глинистого сырья.

Стеклобой также может использоваться в производстве бетона. Однако при введении стекольного боя в состав бетона происходит взаимодействие аморфного кремнезема, входящего в состав стекла, со щелочами цемента. В результате образуется гель, который разбухает и приводит к растрескиванию и разрушению бетона [34]. При использовании стеклобоя в бетонной промышленности данное взаимодействие необходимо учитывать. Эффективным способом подавления щелочно-кремниевой реакции является введение в состав стеклобетона добавки силикагеля (в количестве 4-8% от массы цемента), что позволяет снизить расширение стеклобетона до уровня ниже критического даже при наличии в составе



стеклобетона дополнительного количества щелочи. Силикагель сорбирует на своей поверхности свободный гидроксид кальция и ионы щелочных металлов. При этом он не проникает в поры цементного камня и не вызывает расширения бетона [35].

Другим способом предупреждения щелочно-кремниевой реакции является помол стекольного заполнителя до мелкодисперсных фракций. При использовании фракций менее 1.25 мм расширение бетонов за 14 недель составляет не более 0.02-0.04%. Если стекло размолото тонко, риск разрушения стеклобетона значительно снижается [35].

Еще одним способом избежать щелочно-кремниевое взаимодействие является частичная кристаллизация стекла. Процесс на поверхности крупнодисперсного стекла может быть активирован при повышенных температурах (973-993 К) в присутствии центров кристаллизации, например, порошка кварцевого песка. Эксперименты с высокощелочными бетонами при использовании такого заполнителя показывают, что расширение образцов, по сравнению с таковыми, включающими немодифицированный стеклобой, оказывается в 2-7 раз меньше, в зависимости от концентрации щелочи и фракции заполнителя [34]. Количество стеклобоя, применяемого в бетонных смесях, различно и зависит от назначения и состава бетона. Применение отходов стекла в изготовлении бетонных изделий, помимо утилизации, позволяет повысить прочность и внешний вид бетонных изделий, улучшить их тепло- и звукоизоляционные свойства, снизить коэффициент температурного расширения.

Работы по изготовлению бетонов с использованием стеклобоя ведутся в России, странах СНГ, Канады, Франции, Германии и др. На рис. 3 приведены составы бетонов с использованием стеклобоя, разработанные в разных странах [31, 32].

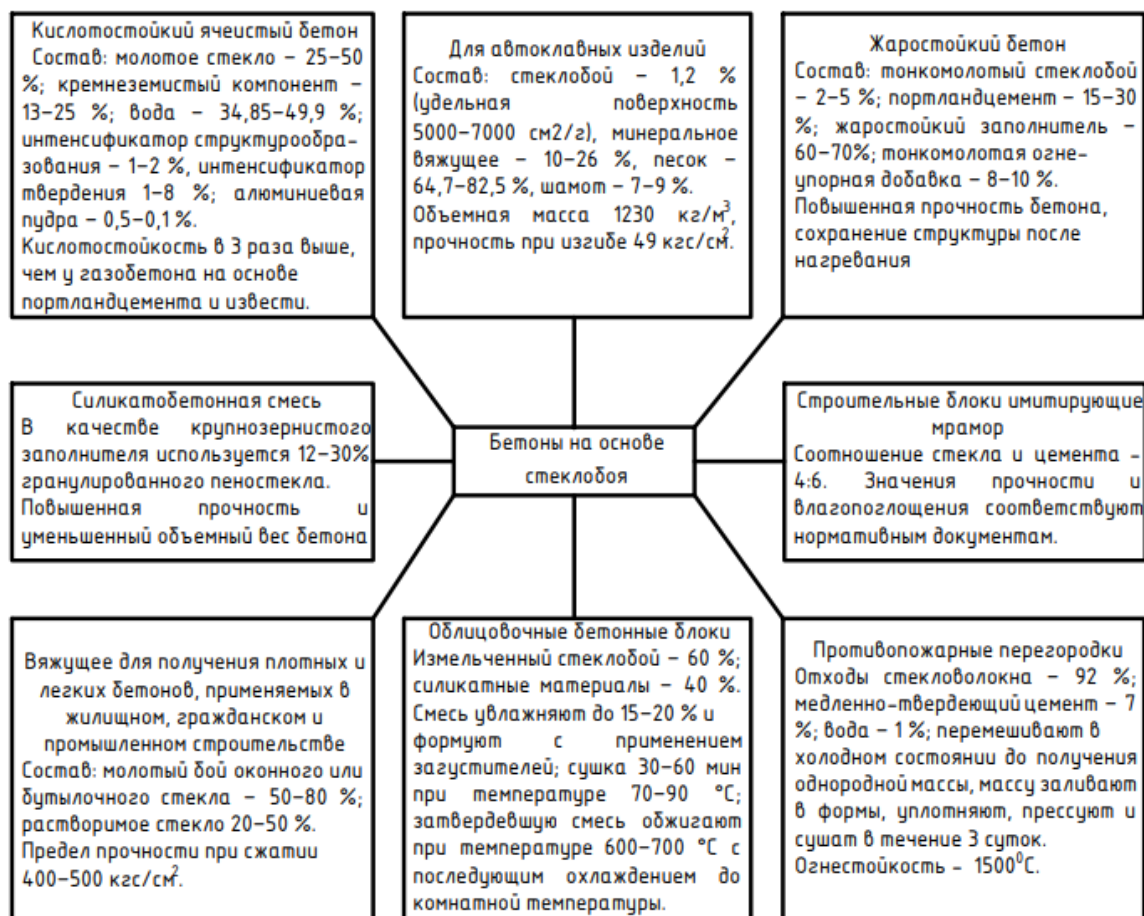
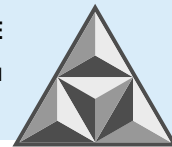


Рис. 3. Существующие составы бетонов с использованием стеклобоя

Fig. 3. Current concrete compositions using glass waste



Помимо прочего, отходы стеклобоя используют для производства пеностекла, которое является хорошим изоляционным материалом и обладает рядом полезных свойств для строительства. Пеностекло имеет малый объемный вес, низкие показатели водопоглощения и теплопроводности, однако повышенную устойчивость в агрессивных средах и огнестойкость. Во многих странах проводят исследования, направленные на снижение себестоимости пеностекла за счет использования стеклобоя и недефицитных дешевых вспенивателей.

В [36] проведено исследование, направленное на синтез пеноматериалов из натриевого жидкого стекла средней плотностью  $1320 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  в качестве вяжущего, стеклянного порошка из стеклобоя насыпной плотностью  $1600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  в качестве наполнителя, ускорителя твердения – кремнефторида натрия и пенообразователя «Фэйри» (моющее средство для посуды, взятое в количестве 4% от массы вяжущего). Установлено, что композиции с соотношением жидкое: наполнитель = 1:2 отличаются оптимальной плотностью ( $460 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) и прочностью 1.1 МПа (в возрасте 7 сут.).

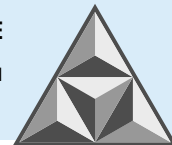
На заводе «Пеноситал» разработана и освоена технология по производству пеностекла [32]. Сырьем для производства являются вода, стеклобой и реагенты для вспенивания. Стеклобой, пришедший на предприятие, отделяется от мусора и подается в сушильный барабан, а затем – в дробилку. Далее стеклобой с помощью элеватора поступает в расходный бункер-накопитель. В процессе производства молотый стеклобой и смесь реагентов поступают в смеситель, на выходе из которого масса подается в окатыватель для формирования гранул и затем – на склад.

В производстве пеностекольного гравия гранулы загружают в бункер-дозатор, откуда они дозируются в барабанную печь вместе с опудривателем, дозируемым из другого бункера. На выходе из печи вспененные гранулы охлаждают в барабанном холодильнике и отделяют от опудривателя, отсеивают по фракциям, фасуют и упаковывают.

В производстве пеностеклянных плит и блоков полуфабрикат загружают в весовой дозатор и далее – в печные тележки, которые направляются в проходную печь. На выходе из печи вспененные блоки (полуфабрикаты) вынимают из тележки и подают на линию распиловки.

Также в [32] описан разработанный в США способ получения пеностекла из стеклобоя с введением реагентов, обеспечивающих включение в структуру гидроксильных групп. Измельченные отходы стекла, имеющие частицы размером 29 мкм, помещают в автоклав и выдерживают в течение нескольких часов в атмосфере насыщенного водяного пара при температуре 663 К и давлении  $744.8\cdot 10^4$  Па. Затем стеклобой охлаждают до комнатной температуры, после чего вновь нагревают в печи до 1373 К. При этой температуре гидроксильные группы вызывают вспенивание размягченного стекла.

Другим направлением применения стеклобоя является дорожное строительство. Для изготовления дорожного бетона стеклобой тщательно дробят с целью получения минерального порошка. Такой порошок является важнейшим структурообразующим компонентом асфальтобетона. На его долю приходится 90-95% суммарной поверхности минеральных зерен, входящих в состав асфальтобетона. Основная цель – перевод битума в пленочное состояние, а также заполнение пор между крупными частицами, в результате чего повышается плотность и прочность асфальтобетона. Минеральному порошку из стекла свойственна развитая поверхность и отсутствие пористости и, как следствие, более высокое набухание в смеси с битумом и дегтем. Наличие стекла в смеси улучшает способность удерживать тепло, что позволяет готовить смесь при температуре 408 К и укладывать



ее при температуре до 277 К. Это дает возможность получить более плотное дорожное покрытие, чем в случае применения обычного асфальта [32].

Введение в асфальтобетонную смесь до 10% стеклобоя не снижает ее характеристики, а при большем содержании указанного отхода рекомендуется дополнительно вводить в битум добавки извести (2%), нефтеполимерной смолы (15%) или катионных ПАВ (2-3%). Содержание стеклобоя в любых составах не должно превышать 50% от массы смеси.

## РЕЦИКЛИНГ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ОТХОДОВ

Одним из ценных видов отходов, образующихся в процессе производства строительных материалов, строительства и сноса зданий, являются отходы асбестоцемента. Только в производстве асбестоцементных изделий образуются отходы в количестве до 12% от массы сырья [37]. Значительная часть таких отходов вывозится в отвалы, загрязняя окружающую среду. В то же время асбестоцементный камень имеет высокую прочность и низкую теплопроводность, поэтому является перспективным для рециклинга и производства новых материалов.

Проводимый авторами настоящей работы анализ указывает на выгоды использования асбестоцементных отходов для производства стеновых камней, кирпичей, сухих строительных смесей, вяжущего и наполнителей для бетона, асфальтобетона, а также для укрепления грунтов.

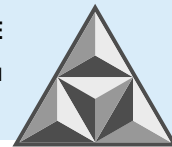
В связи с распространенным мнением о возникновении тяжелых легочных заболеваний у людей, работающих с асбестом, к применению асбеста в строительстве имеется негативное отношение и стремление заменить его равноценным безвредным материалом.

Однако в 1989 г. агентство по охране окружающей среды США отменило предложения о полном запрете асбеста. Институт США по вопросам асбеста, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Международная организация труда (МОТ) считают, что асбест не опасен для здоровья, если загрязнение им не превышает обоснованные нормы. Наименее вредным видом асбеста является хризотилковый, широко применяемый в нашей стране [38]. Согласно федеральному классификационному каталогу, асбестовые отходы относятся к IV классу опасности (вещества малоопасные), поэтому их применение при изготовлении строительных материалов и изделий допускается для всех видов зданий [39].

Существует несколько способов улучшения физико-механических свойств материалов на основе асбестоцементных отходов. Первый способ – помол отходов до высокой удельной поверхности. При этом необходимо учитывать, что условия помола должны обеспечивать максимальную сохранность волокон асбеста (длина волокна  $\geq 0.25$  мм), который должен быть предварительно обезвожен. Второй способ – термообработка. При сушке и обжиге асбестоцементных отходов увеличивается количество способных к гидратации соединений, высушенные или обожженные отходы размалываются легче. Активность материала повышается, однако происходит потеря прочности. Третий способ – добавка кремнеземистых компонентов. В отходах асбестоцемента содержится значительное количество гидроксида кальция, и при введении добавок, содержащих активный кремнезем, за счет пуццолановых реакций могут образовываться низкоосновные гидросиликаты кальция, что приводит к повышению физико-механических характеристик [37].

В [38] описана эффективная технология производства стеновых камней и кирпичей на основе асбестоцементных отходов. Сначала отходы дробят и отсеивают на фракции (5-10 мм и 0-5 мм); крупные частицы возвращают на повторное дробление.





Затем изготавливают сырьевую смесь, состоящую из щебня и песка, золы в качестве кремнеземистой составляющей, асбестоцементной пыли в качестве вяжущего и воды. Изделия формуют в пресс-формах под давлением 20 МПа в течение 30 с и направляют на тепловлажностную обработку в пропарочные камеры при температуре 363-368 К по режиму (3 + 10 + 2) ч. В итоге получают прочный и морозостойкий материал.

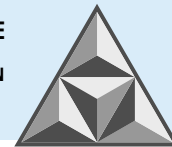
На основе асбестоцементных отходов можно изготавливать вяжущее, пригодное для производства бетонов класса В20-В22.5. Вяжущее получают путем механоактивации смеси асбестоцементных отходов, золы теплоэлектростанций стеклобоя в мельницах ударно-отражательного типа. В качестве добавки, повышающей прочность на изгиб, используется волокнистая добавка отходов производства минераловатных плит в количестве 5% от общей массы смеси [40].

Автор [41] предлагает использовать асбестоцементные отходы для производства сухих смесей. Акцентируется внимание на необходимости снижения в таких отходах содержания шестивалентного хрома. Сухая смесь состоит из портландцемента, асбестоцементных отходов, песка и щелока или сульфита натрия, которые являются дехроматизаторами. Прочность сухих штукатурных смесей в возрасте 28 сут., изготовленных по данной технологии, составляет 6-7 МПа; при этом обеспечивается выполнение требований нормативных документов по содержанию  $Cr^{6+}$ , что обеспечивает экологическую безопасность выпускаемой продукции.

Обосновано получение на основе асбестоцементных отходов безобжигового кирпича марок М100, М125, М150 и тротуарной плитки класса В22.5 [42]. Используется смесь твердых асбестоцементных отходов с размером зерен до 5 мм и золошлаковые отходы ТЭС с размером зерен до 2 мм, а также цемент в количестве 0-5% по массе для изготовления кирпича и 30% – для изготовления плитки. Формирование изделий происходит под прессом при давлении 20-40 МПа. Их себестоимость на 20-25% ниже по сравнению с силикатным кирпичом и традиционной тротуарной плиткой [42].

В [43] предлагается использовать асбестоцементные отходы в виде заполнителя для бетона. Объектом исследования [43] выбран мелкозернистый бетон марки М100. В качестве вяжущего использовали портландцемент М400, в качестве заполнителя – песок с модулем крупности 0.85 и измельченный бой шифера и асбестоцементных труб, рассеянный на фракции 0-5, 10-20 и 20-40 мм. Также использовалась добавка поливинилацетата в количестве 10% по массе для улучшения физико-механических характеристик бетона. Определено, что оптимальными являются составы с фракцией заполнителя 0-5 мм и 10-20 мм при концентрации 33 и 40% соответственно. Полученные бетоны имеют прочность на сжатие до 14 МПа и марку по морозостойкости F40.

Асбестоцементные отходы возможно применять в дорожном строительстве. Такие отходы используют в качестве минерального порошка в составе дорожного асфальтобетона. В [44] представлены исследования структурирующей способности такого порошка. Для этого проведены исследования его смесей с битумом при различном массовом соотношении битум: порошок. Оптимальное содержание битума в асфальтовом вяжущем с использованием мраморного порошка составляет 6.0-6.5%, а для асбестоцементного порошка – 5.5-6.0%. Минеральный порошок на основе асбестоцемента не требует увеличения массы органического вяжущего. Автор [44] отмечает, что использование асбестоцементного минерального порошка позволяет получить плотный асфальтобетон, рекомендуемый при устройстве верхних слоев покрытий автомобильных дорог III и IV категории.



Асбестовые волокнистые и пылеватые отходы рекомендуется применять для укрепления грунтов. В [45] оценены свойства грунтов, армированных асбестовыми отходами (до 20% от массы грунта) и обработанных кремнефтористоводородной кислотой (2.5-7.5% от массы сухой смеси). Отмечается, что прочности грунтовой композиции на сжатие и при изгибе возрастают по мере роста расхода отходов асбеста и кислоты. Добавка асбеста увеличивает водопоглощение композиции, в то время как добавка кислоты снижает этот показатель. Использование таких отходов для армирования связанных грунтов строительных площадок в регионах, где отсутствуют природные каменные материалы, может обеспечить значительный экономический эффект.

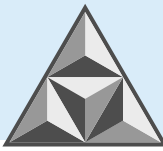
## РЕЦИКЛИНГ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Накопление пластиковых отходов является глобальной проблемой современности. Такие материалы трудно утилизировать, а при их сжигании в атмосферу выделяются токсичные вещества. Они накапливаются на полигонах и свалках с огромной скоростью и разлагаются сотни лет, что приводит к катастрофическому загрязнению окружающей среды. В ходе строительства и сноса зданий и сооружений также образуются значительные объемы отходов на основе полимеров. Это обрезки труб, оплетки кабелей, оконные рамы, двери, различные декоративные материалы, материалы тары и упаковки и др. Рециклинг таких отходов не только может улучшить экологическую обстановку в мире, но и уменьшить себестоимость производства строительных материалов и изделий.

Пластиковые отходы уже сейчас в некоторых странах применяют для изготовления элементов кровли, черепицы, плитки, для отделки стен и полов и др. Также выявлены перспективные направления использования отходов пластмасс в строительстве дорог. В Индии существует опыт создания асфальтовой смеси из переработанного пластика. Пластмассовые отходы обогащаются стабилизаторами, смешиваются с битумом, и в результате получается новое дорожное водонепроницаемое покрытие, отличающееся прочностью и долговечностью [46]. В Канаде реализуется проект по созданию нового дорожного покрытия, которое на 80% состоит из асфальта и на 20% из переработанного пластика. По сравнению с традиционным асфальтом, для производства дорожного полотна требуется меньшая температура. Несколько километров такой дороги позволяют очистить планету от кубометров мусора [46].

Пластиковые отходы также возможно использовать в качестве заполнителя строительных растворов и бетонов. В [47] проведено исследование по усилению штукатурного раствора порошком из отходов стекла и волокнами из отходов типа полиэтилентерефталата. Было отмечено увеличение прочности на изгиб у образцов штукатурки, армированных волокнами из пластиковых отходов (1-2% пластиковых волокон от массы гипса).

Авторами [48] проведен ряд исследований, направленных на изучение свойств бетонных смесей, в которых мелкий заполнитель из речного песка заменен на гранулы, изготовленные путем измельчения отходов труб из поливинилхлорида (ПВХ). Для приготовления составов использовали легкий керамзитобетонный заполнитель в качестве крупной фракции, портландцемент в качестве вяжущего и пластификатор для контроля подвижности смесей. Бетоны на основе заполнителя из ПВХ обладают пониженной прочностью на сжатие и растяжение, однако меньшей усадкой, плотностью, а также более устойчивы к проникновению хлорид-ионов. Авторы рекомендуют при изготовлении бетонов с включением ПВХ ограничивать содержание отходов до 15% по объему. При соблюдении указанного ограничения такие бетоны возможно использовать для возведения ненесущих элементов.



Переработанные ПВХ отходы можно условно разделить на пластмассовые заполнители и пластмассовые волокна. Указывается, что бетоны, содержащие пластмассовые волокна из отходов ПВХ в количестве < 1%, имеют, по сравнению с обычным бетоном, повышенную прочность на сжатие и изгиб, растяжение при расщеплении, однако при увеличении содержания пластиковых волокон сверх этого уровня происходит снижение механических характеристик бетона [49].

Большинство исследований в указанной области направлено на переработку полиэтилентерефталата (ПЭТ) и ПВХ. Также в процессе строительства и сноса образуются отходы сшитого полиэтилена, используемого для изготовления кабелей и систем инженерной коммуникации (отопления, охлаждения, водоснабжения).

По мнению авторов настоящей работы, вопрос применения отходов сшитого полиэтилена в строительстве, по сравнению с другими видами отходов, изучен в недостаточной степени. Поэтому на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых проведено исследование, направленное на синтез нефтестойких бетонов с использованием заполнителей из отходов сшитого полиэтилена. В качестве частичной замены цемента была дополнительно использована мелкая фракция кирпичной крошки, получаемая в результате дробления кирпичного боя. Для увеличения плотности бетонов в состав всех образцов вводили добавку белой сажи. При затворении смеси использовали раствор хлористого кальция в целях повышения нефтестойкости.

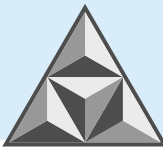
Примеры составов синтезированных бетонов и их свойства приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Составы синтезированных бетонов с заполнителем из сшитого полиэтилена

**Table 2.** Compositions of synthesized concretes with an aggregate made of cross-linked polyethylene

Марка состава	Компоненты, % мас.						Свойства			
	Портландцемент	Кирпичная крошка фракции менее 0.08 мм	Белая сажа	Сшитый полиэтилен фракции менее 0.63 мм	Поликарбоксилатный пластификатор	10%-й раствор CaCl <sub>2</sub>	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа	Прочность на изгиб $R_{изг}$ , МПа	Коэффициент стойкости бетона в масле, $K_{ст}$
НБ-1	42.4	16.9	0.8	21.0	0.4	18.5	2010	39.5	3.7	0.99
НБ-2	43.4	17.3	0.8	21.5	0.4	16.6	1940	41.0	3.5	
НБ-3	40.2	16.0	0.8	26.0	0.4	16.6	1870	21.5	4.1	

В ходе исследования авторами настоящей работы отмечалось положительное влияние использования мелкой фракции полиэтилена на прочность и плотность образцов бетона. Выявлено, что структура для образца бетона, где использовали полиэтилен фракции до 0.63 мм, более однородна и уплотнена, по сравнению с образцом бетона, включающим полиэтилен более крупной фракции. Повышение нефтестойкости бетона достигается за счет использования мелкой фракции полиэтилена, наполнителя из мелкой фракции кирпичной крошки, обладающего пуццолановым эффектом, добавки хлористого кальция, использования высокого содержания цемента и низких В/Ц отношений, а также вследствие термической обработки готовых образцов. Введенные в бетонную смесь полимеры расплавляются при тепловой обработке и при последующем застывании колыматируют поры. Температура плавления полиэтилена должна быть в пределах 343-353 К, что соответствует экзотермической реакции гидратации цемента. Результаты данных исследований служат основанием для синтеза новых композиционных материалов с реализацией рециклинга отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя.



Анализ рециклинга строительных отходов обобщен в виде схемы (см. рис. 4).

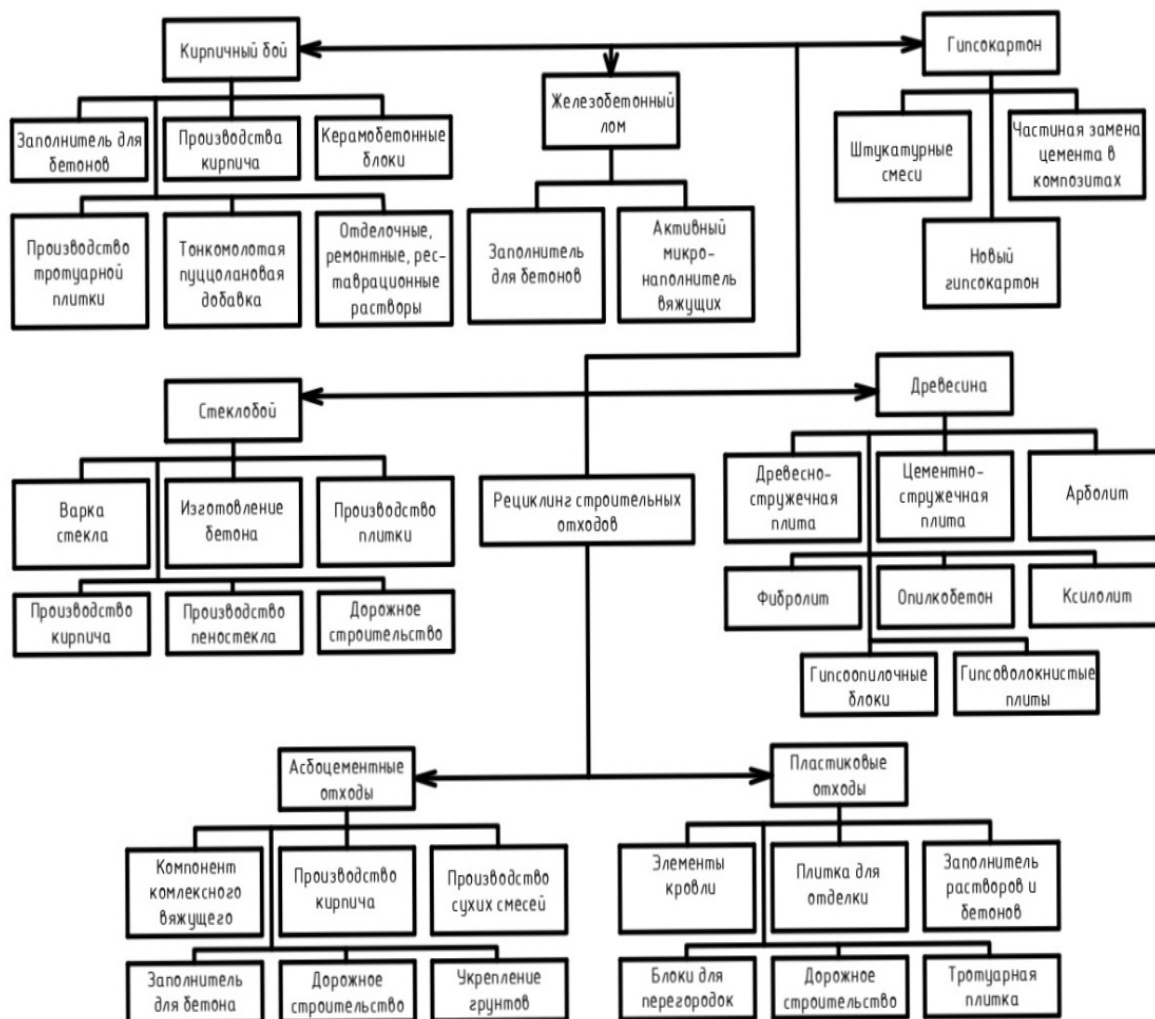


Рис. 4. Рециклинг строительных отходов

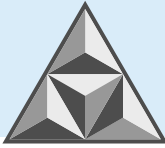
Fig. 4. Recycling of construction waste

На основании проведенного анализа выявлено, что применение строительных отходов при изготовлении новых композиционных материалов и изделий является весьма перспективным научно-практическим направлением.

## ВЫВОДЫ

Рециклинг отходов строительства открывает широкие перспективы и возможности получения новых строительных материалов на основе вторичного сырья, решает проблемы экономики и экологии на основе осуществления принципа «отходы – в доходы». Наиболее исследованными в сфере рециклинга являются отходы кирпичного и стеклянного боя, бетонного лома, гипса (гипсокартона), древесины и асбестоцемента.

Среди отходов, еще не нашедших широкого применения в технологиях производства строительных материалов, выделен сшитый полиэтилен, который трудно подчиняется традиционным методам рециклинга. Проведенное исследование, направленное на синтез нефтестойких бетонов с использованием отходов сшитого полиэтилена и кирпичной крошки, выявило высокие перспективы переработки данных отходов.

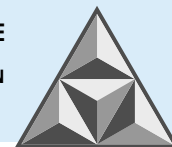


**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

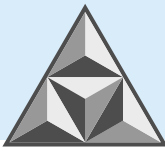
**Acknowledgements.** The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of VLSU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Соколов Л.И.** Классификация и рециклинг строительных отходов // *Управление техносферой*. 2021. Т. 4, вып. 1. С. 39-49. DOI 10.34828/UdSU.2021.40.44.008. URL: <https://technosphereing.ru>
2. **Гамаюнова О.С., Слободянюк Т.Р.** Вторичное использование строительных отходов // *Высокие технологии в строительном комплексе*. 2022. № 1. С. 18-26.
3. **Олейник С.П.** Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2016. Т. 3, № 2. DOI: 10.15862/03RR0116. URL: <http://resources.today/issues/vol3-no2.html>
4. **Лунев Г.Г., Прохоцкий Ю.М.** Рециклинг вторичных строительных ресурсов. Проблемы и перспективы отрасли на примере г. Москвы // *Всероссийский экономический журнал ЭКО*. 2020. № 4. С. 166-192. DOI: 10.30680/ЕСО.
5. **Жуков С.Ю.** Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // *Проектирование и строительство: сборник научных трудов 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров (Курск, 04-05 июня 2018 года)*. Курск: Юго-западный государственный университет, 2018. С. 61-63.
6. **Муртазаев С-А.Ю., Хадисов В.Х., Хаджиев М.Р.** Использование отходов производственного брака и керамического боя кирпича для приготовления легкого бетона // *Труды грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова*. 2011. № 11. С. 157-162.
7. **Хаджиев М.Р.** Бетонные композиты на заполнителях из керамического кирпичного боя // *Евразийский союз ученых*. 2014. № 5. С. 37-40. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.
8. **Хаджиев М.Р.** Керамобетон на основе вторичных заполнителей из кирпичного боя для мелкоштучных стеновых изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Грозный, 2015. 25 с.
9. **Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х.** Мелкоштучные стеновые изделия из легкого керамобетона для ограждающих конструкций зданий и сооружений // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2014. № 4. С. 137-142.
10. **Батдалов М.М., Хадисов В.Х.** Использование кирпичного боя для производства строительных композитов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. № 23. С. 102-105.
11. **Муртазаев С-А.Ю., Сайдумов М.С., Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х.** Ячеистый керамобетон на основе заполнителей из вторичного сырья // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2014. № 3 (34). С. 74-81.
12. **Sadek D.M.** Phisico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates // *Journal of advanced research*. 2012. No. 3. P. 253-260.



13. **Debieb F., Kenai S.** The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete // *Construction and building materials*. 2008. No. 22(5). P. 886-893. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
14. **Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Романенко М.И.** Пробуждение гидравлической активности наполнителей и заполнителей из лома глиняного кирпича // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 11 (95). С. 563-572.
15. **Aliabdo A.A., Abd-Elmoati M., Hassan H.H.** The use of crushed clay bricks in the concrete industry // *Alexandria Engineering Journal*. 2014. Vol. 53, no. 1. P. 151-168. DOI:10.1016/j.aej.2013.12.003.
16. **Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L.** Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. // *Construction and building materials*. 2012. No. 31. P. 289-293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
17. **Пуляев С. М.** Бетоны на заполнителях из бетонного лома для сборных железобетонных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005. 20 с.
18. **Успанова А.С., Исламов А.А., Куразов М.С., Иноркаев И.С-А., Вахажи Х-М.М.** Строительные штукатурные смеси на основе мелкой фракции продукта дробления кирпичного боя и производственного брака кирпича // *Фундаментальные основы строительного материаловедения: сборник докладов Международного онлайн конгресса. (Белгород, 06-11 октября 2017 года)*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 906-913.
19. **Silva J., Brito de J., Veiga R.** Incorporation of fine ceramics in mortars. // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. P. 556-564. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
20. **Фоменко А.И., Грызлов В.С., Каптюшина А.Г.** Отходы керамического кирпича как эффективный компонент строительных композитов // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 2. С. 260-264.
21. **Муртазаев С-А.Ю., Исмаилова З.Х., Хасиев А.А., Нахаев М.Р.** Утилизация отсева дробления бетонного лома // *Экология и промышленность России*. 2012. № 8. С. 26-28.
22. **Ефименко А.З.** Бетонные отходы – сырье для производства эффективных строительных материалов // *Материалы. Технологии бетонов*. 2014. № 2. С. 17-21.
23. **Магсумов А.Н., Шарипянов Н.М., Красникова Н.М.** Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки: международный научный журнал*. 2018. № 6. С. 29-33.
24. **Чурсин С.И., Поздняков А.В.** Тяжелые бетоны с использованием модифицированного мелкого заполнителя из бетонного лома // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2018. № 4 (2). С. 209-215.
25. **Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохина Р.А., Мурали Г.** Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // *Строительные материалы и изделия*. 2020. № 3. С. 28-39.
26. **Bumanis G., Zorica J., Korjajkins A., Bajare D.** Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder // *Recycling*. 2022. No. 7 (30). DOI: 10.3390/recycling7030030.
27. **Hansen S., Perdarn S.** Application of Recycled Gypsum Wallboards in Cement Mortar. // *Conference: 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials*. CSCE Annual Conference At: Laval, QC, Canada, 2019.
28. **Кислицына С.Н., Шитова И.Ю.** Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности: учеб. пособие. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
29. **ГОСТ 19222-2019.** Арболит и изделия из него. М.: Издательство Стандартиформ, 2019. 31 с.
30. **ГОСТ 26816-2016.** Плиты цементно-стружечные. М.: Издательство Стандартиформ, 2016. 15 с.
31. **Минько Н.И., Калатоци В.В.** Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 82-88.
32. **Мелконян Р.Г., Власова С.Г.** Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учеб. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2013. 100 с.
33. **Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А., Гокова Е.Н.** Эффективный материал для зеленого строительства на основе вторичного стеклобоя // *Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства*. 2016. С. 111-116.



34. Использование стеклобоя как заполнителя бетонов. URL: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6702&cat\\_id=24&page\\_id=2](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6702&cat_id=24&page_id=2).
35. **Белокопытова А.С.** Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания композиционных материалов: автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 2006. 18 с.
36. **Григорова Ю.А.** Вторичное использование стеклобоя в производстве теплоизоляционных материалов // *Современные научные исследования и инновации*. 2014. № 8. Ч. 1. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/08/37026>
37. **Багаутдинов А.А.** Способы улучшения физико-механических свойств материалов и изделий на основе асбестоцементных отходов // *Вестник УлГТУ*. 2004. № 2. С. 76-78.
38. **Багаутдинов А.А.** Стеновые строительные изделия на основе отходов асбестоцементного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.
39. Росприроднадзор. Федеральный классификационный каталог отходов. URL: <https://rpn.gov.ru/fkko/45592111604/>
40. **Кулигина Т.Н.** Разработка строительных материалов на основе отходов асбестоцементного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2007. 23 с.
41. **Васильева Л.В., Губская А.Г.** Возможность использования асбестоцементных отходов для производства сухих строительных смесей // *Сухие строительные смеси*. 2012. № 2. С. 15-16.
42. **Щукин Е.А., Щукина Е.Г.** Строительные материалы с использованием асбестоцементных отходов // *Актуальные вопросы строительного материаловедения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. (Улан-Удэ, 21-24 июля 2021 года)*. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова, 2021. С. 124-128.
43. **Ярцев В.П., Репина Е.И.** Влияние наполнителей из асбестоцементных отходов на физико-механические свойства и долговечность цементно-песчаных бетонов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 16-22.
44. **Калашников П.И.** Асфальтобетон с использованием отходов асбестоцементных изделий // *Научные исследования*. 2017. № 6. Т. 2. С. 20-24.
45. Изучение реакционной способности асбестов, подбор составов смесей. URL: [https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie\\_reaktsionnoy\\_sposobnosti\\_asbestov](https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie_reaktsionnoy_sposobnosti_asbestov)
46. **Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н.** Переработанный пластик в дорожном строительстве // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. № 7. С. 105-115.
47. **Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H.** Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // *ICSI 2019. The 3rd International Conference on Structural Integrity*. 2019. P. 170-176. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.023.
48. **Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L.** Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // *Waste management*. 2009. No. 29. P. 621-629. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014
49. **Сиков Н.Е., Серегин А.И., Юркин Ю.В.** Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 8. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/arhive/n8y2022/7845>

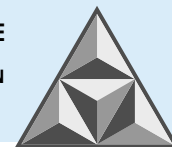
Поступила в редакцию 20.07.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

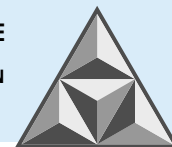
## REFERENCES

1. **Sokolov, I.I.** (2021) Classification and recycling of construction waste, *Upravlenie tekhnosferoy*, 4(1), pp. 39-49. DOI 10.34828/UdSU.2021.40.44.008 [online]. Available at: <https://technosphereing.ru> (in Russian).
2. **Gamayunova, O.S. & Slobodyanyuk, T.R.** (2022) Recycling of construction waste, *Vysokie tekhnologii v stroitel'nom komplekse*, (1), pp. 18-26 (in Russian).

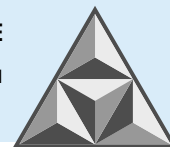


3. **Oleynik, S.P.** (2016) Construction waste during the reconstruction of buildings and structures, *Internet-zhurnal «Otkhody i resursy»*, 3(2). DOI: 10.15862/03RRO116 [online]. Available at: <http://resources.today/issues/vol3-no2.html> (in Russian).
4. **Lunev, G.G. & Prokhotskiy, Yu.M.** (2020) Recycling of secondary construction resources. Problems and prospects of the industry on the example of Moscow, *Vserossiiskiy ekonomicheskoy zhurnal EKO*, (4), pp. 166-192 (in Russian). DOI: 10.30680/ECO.
5. **Gukov, S.U.** (2018) Construction waste during the reconstruction of buildings and structures, *Proektirovanie i stroitel'stvo: sbornik nauchnykh trudov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov. (Kursk, 04-05 iyunya 2018 goda)*. Kursk: Yugo-zapadny gosudarstvennyy universitet, pp. 61-63 (in Russian).
6. **Murtazaev, S-A.U., Khadisov, V.H. & Khadzhiev, M.R.** (2011) The use of industrial waste and ceramic brick scrap for the preparation of lightweight concrete, *Trudy groznenskogo gosudarstvennogo neftyanogo tekhnicheskogo universiteta im. akademika M.D. Millionshchikova*, (11), pp. 157-162 (in Russian).
7. **Khadzhiev, M.R.** (2014) Concrete composites on aggregates from ceramic brick scrap, *Evraziiskiy soyuz uchenykh*, (5), pp. 37-40 DOI: 10.31618/ESU.2413-9335 (in Russian).
8. **Khadzhiev, M.R.** (2015) *Ceramic concrete based on secondary aggregates from brick scrap for small-piece wall products*. PhD. Groznyj (in Russian).
9. **Khadzhiev, M.R. & Khadisov, V.H.** (2014) Small-piece wall products made of lightweight ceramic concrete for enclosing structures of buildings and structures, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskoe nauki*, (4), pp. 137-142 (in Russian).
10. **Batdalov, M.M. & Khadisov, V.H.** (2011) The use of brick scrap for the production of building composites, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskoe nauki*, (23), pp. 102-105 (in Russian).
11. **Murtazaev, S-A.U., Sajdumov, M.S., Khadzhiev, M.R. & Khadisov, V.H.** (2014) Cellular ceramic concrete based on aggregates from secondary raw materials, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskoe nauki*, 3 (34), pp. 74-81 (in Russian).
12. **Sadek, D.M.** (2012) Phisico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates, *Journal of advanced research*, (3), pp. 253-260.
13. **Debieb, F. & Kenai, S.** (2008) The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Construction and building materials*, 22(5), pp. 886-893. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
14. **Romanenko, I.I., Petrovnina, I.N., Elichev, K.A. & Romanenko, M.I.** (2022) Awakening of hydraulic activity of fillers and aggregates from clay bricks scrap, *Inzhenerniy vestnik Dona*, 11(95), pp. 563-572 (in Russian).
15. **Aliabdo, A.A. Abd-Elmoati, M. & Hassan, H.H.** (2014) The use of crushed clay bricks in the concrete industry, *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), pp. 151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003.
16. **Ge, Z., Gao, Z., Sun, R. & Zheng, L.** (2012) Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method, *Construction and building materials*, (31), pp. 289-293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
17. **Pulyaev, S.M.** (2005) *Concrete on aggregates from concrete scrap for precast concrete products*. PhD. Moscow (in Russian).
18. **Uspanova, A.S., Islamov, A.A., Kurazov, M.S., Inorkaev, I.S-A. & Vahazhi, H-M.M.** (2017) Construction plaster mixtures based on a fine fraction of the product of crushing of brick scrap and production waste of bricks, *Fundamental'nye osnovy stroitel'nogo materialovedeniya. Sbornik dokladov mezhdunarodnogo onlajn kongressa. (Belgorod, 06-11 oktyabrya 2017 goda)*. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskoy universitet im. V.G. Shuhova, pp. 906-913 (in Russian).
19. **Silva, J., Brito de J. & Veiga, R.** (2009) Incorporation of fine ceramics in mortars, *Construction and Building Materials*, (23), pp. 556-564. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
20. **Fomenko, A.I., Gryzlov, V.S. & Kapyushina, A.G.** (2016) Ceramic brick waste as an effective component of building composites, *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*, (2), pp. 260-264 (in Russian).
21. **Murtazaev, S-A.U. Ismailova, Z.Kh., Khasiev, A.A. & Nakhaev, M.R.** (2012) Disposal of screening of concrete scrap, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, (8), pp. 26-28 (in Russian).
22. **Efimenko, A.Z.** (2014) Concrete waste – raw materials for the production of efficient building materials, *Materialy. Tekhnologii betonov*, (2), pp. 17-21 (in Russian).





23. **Magsumov, A.N., Sharipyanov, N.M. & Krasnikova, N.M.** (2018) The use of concrete scrap as a coarse aggregate for the production of concrete mixtures, *Simvol nauki: mezhdunarodniy nauchniy zhurnal*, (6), pp. 29-33 (in Russian).
24. **Chursin, S.I. & Pozdnyakov, A.V.** (2018) Heavy concretes using modified fine aggregate from concrete scrap, *Vestnik Donbasskoy nacionalnoy akademii stroitel'stva i arkhitektury*, 4(2), pp. 209-215 (in Russian).
25. **Akhmed, A.A., Fedyuk, R.S., Liseyev, Yu.L., Timokhina, R.A. & Murali, G.** (2020) Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete, *Stroitel'nye materialy i izdeliya*, (3), pp. 28-39 (in Russian).
26. **Bumanis, G., Zorica, J., Korjakins, A. & Bajare, D.** (2022) Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder, *Recycling*, 7(30). DOI: 10.3390/recycling7030030.
27. **Hansen, S. & Perdam, S.** (2019) Application of Recycled Gypsum Wallboards in Cement Mortar, *Conference: 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials*. CSCE Annual Conference At: Laval, QC, Canada.
28. **Kislitsyna, S.N. & Shitova, I.U.** (2016) *Methods of processing waste from the woodworking industry*. Penza: PGUAS (in Russian).
29. **GOST 19222-2019.** *Arbolit and its products. Specifications* (in Russian).
30. **GOST 26816-2016.** *Cement-chipboard plates. Technical conditions* (in Russian).
31. **Min'ko, N.I. & Kalatozi, V.V.** (2018) The use of cullet in the technology of materials for construction purposes, *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*, (1), pp. 82-88 (in Russian).
32. **Melkonyan, R.G. & Vlasova, S.G.** (2013) *Environmental and economic problems of using cullet in glass production*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta (in Russian).
33. **Bessmertnyj, V.S., Zhernovoy, F.E., Dorokhova, E.S., Izotova, I.A. & Gokova, E.N.** (2016) An effective material for green construction based on secondary glass scrap, *Intellectual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva*, pp. 111-116 (in Russian).
34. *The use of cullet as a concrete aggregate* [online]. Available at: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6702&cat\\_id=24&page\\_id=2](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6702&cat_id=24&page_id=2) (in Russian).
35. **Belokopytova, A.S.** (2006) *Development of cullet recycling processes by creating composite materials*. PhD. Moscow (in Russian).
36. **Grigorova, Y.A.** (2014) Secondary use of cullet in the production of thermal insulation materials, *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, (8) [online]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2014/08/37026> (in Russian).
37. **Bagautdinov, A.A.** (2004) Methods for improving the physical and mechanical properties of materials and products based on asbestos cement waste, *Vestnik UlGTU*, (2), pp. 76-78 (in Russian).
38. **Bagautdinov, A.A.** (1994). *Wall construction products based on asbestos cement production waste*. PhD. Moscow (in Russian).
39. Rosprirodnadzor. *Federal Classification Catalog of Waste* [online]. Available at: <https://rpn.gov.ru/fkko/45592111604/> (accessed 13.07.2023) (in Russian).
40. **Kuligina, T.N.** (2007) *Development of building materials based on asbestos cement production waste*. PhD. Ivanovo (in Russian).
41. **Vasileva, L.V. & Gubskaya, A.G.** (2012) The possibility of using asbestos cement waste for the production of dry building mixes, *Sukhie stroitelnye smesi*, (2), pp. 15-16 (in Russian).
42. **Shchukin, E.A. & Shchukina, E.G.** (2021) Construction materials using asbestos cement waste, *Aktualnye voprosy stroitel'nogo materialovedeniya. (Ulan-Ude, 21-24 iyulya 2021 goda)*. Ulan-Ude: Buryatskiy gosudarstvenniy universitet im. Dorzhi Banzarova, pp. 124-128 (in Russian).
43. **Yartsev, V.P. & Repina, E.I.** (2018) The influence of aggregates from asbestos-cement waste on the physical and mechanical properties and durability of cement-sand concrete, *Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova*, (10), pp. 16-22 (in Russian).
44. **Kalashnikov, P.I.** (2017) Asphalt concrete using waste asbestos cement products, *Nauchnye issledovaniya*, 6(2), pp. 20-24 (in Russian).
45. *Study of the reactivity of asbestos, selection of mixtures* [online]. Available at: [https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie\\_reaktsionnoy\\_sposobnosti\\_asbestov](https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie_reaktsionnoy_sposobnosti_asbestov) (in Russian).



46. **Lsyannikov, A.V., Tretyakova, E.A. & Lsyannikova, N.N.** (2017) Recycled plastic in road construction, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, (7), pp. 105-115 (in Russian).
47. **Salim, K., Houssam, A., Belaid, A. & Brahim, H.** (2019) Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass, *ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity*, pp. 170-176. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.023.
48. **Kou, S.C., Lee, G., Poon, C.S. & Lai, W.L.** (2009) Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste management*, (29), pp. 621-629. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
49. **Sikov, N.E., Seryogin, A.I. & Yurkin, U.V.** (2022) The use of plastic waste as an aggregate in cement mortar and concrete preparation, *Inzhenernyj vestnik Dona*, (8) [online]. Available at: <https://ivdon.ru/magazine/arhive/n8y2022/7845> (in Russian).

*Received 20.07.2023*

*Approved after reviewing 20.09.2023*

*Accepted 22.09.2023*