

П.Ю. МАТАР<sup>1</sup>, канд. техн. наук (pmatar@ul.edu.lb);  
В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ<sup>2</sup>, канд. техн. таук (victoriapetrov@gmail.com),  
Т.Р. БАРКАЯ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, М.Ф. БАЙСАРИ<sup>1</sup>, магистр, Л.С. ЭЛЬ-ХАСАНИЙЕ<sup>1</sup>, инженер

<sup>1</sup> Ливанский университет (Ливан, г. Бейрут, Музейная площадь, Р.О. Вох 399)

<sup>2</sup> Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, набережная Аф. Никитина, 22)

## Пустотелые стеновые бетонные блоки с рециклированными заполнителями и стеклом

Лом бетонных конструкций является основным видом отходов строительства и сноса ветхих зданий и сооружений. Рециклированный заполнитель, получаемый в результате дробления бетонного лома, может быть повторно использован в качестве заполнителя при производстве бетонной смеси. Еще одним из ценных отходов строительства и сноса является стекло, которое также может быть рециклировано и использовано в качестве заполнителя в бетоне. Целью настоящей работы явилось изучение влияния рециклированных заполнителей и стекла на характеристики пустотелых стеновых бетонных блоков. Испытания проводились на четырех группах бетонных блоков, содержащих портландцемент, рециклированный заполнитель, рециклированное стекло и суперпластификатор, а также одной группе блоков, не содержащих рециклированные материалы. Были исследованы свойства бетонных смесей и блоков, получаемых на их основе.

**Ключевые слова:** стеновые бетонные блоки, рециклинг, заполнитель, стекло, свойства.

P.Y. MATAR<sup>1</sup>, Ph.D. (pmatar@ul.edu.lb); V.B. PETROPAVLOVSKAYA<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (victoriapetrov@gmail.com);  
T.R. BARKAYA<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering); M.F. BAYSARY<sup>1</sup>, M.Sc., L.S. EL-HASSANIEH<sup>1</sup>, B.Eng.

<sup>1</sup> Lebanese University (Lebanon, Museum Square)

<sup>2</sup> Tver State Technical University (170026, Tver, A. Nikitina Wharf, 22, Russian Federation)

### Concrete Wall Hollow Blocks with Recycled Aggregates and Recycled Glass

Concrete structures debris is the main type of construction and demolition (C&D) waste resulting from old buildings and structures. Recycled aggregate obtained from crushing concrete waste can be reused as aggregate in producing concrete mixes. Another valuable C&D waste is the glass which can be also recycled and used as aggregate in concrete. This research aimed at studying the effect of recycled aggregates and glass on the properties of concrete wall hollow blocks. Tests have been carried out on four groups of blocks containing Portland cement, recycled aggregate, recycled glass and superplasticizer, and one group of blocks not containing recycled materials. The properties of concrete mixes and blocks have been tested.

**Keywords:** concrete wall blocks, recycling, aggregate, glass, properties.

Мировое производство бетона связано с добычей, переработкой и использованием около 20 млрд т песка и горных пород в год, сопровождаемыми пылеобразованием и необходимостью транспортировки, также являющимися серьезной нагрузкой на окружающую среду. Поэтому замена природных заполнителей на различные техногенные отходы, включая лом сносимых бетонных конструкций, может заметно снизить эту нагрузку [1].

В настоящее время ежегодно образуется свыше 1 млрд т отходов строительства и сноса [2]. Например, одно 5-этажное здание обычно производит около 15 тыс. т отходов.

Такие отходы, как правило, перевозятся на свалки. Однако во многих странах Европы при приеме отходов на полигоны требуют официальных доказательств того, что их невозможно переработать. Складирование строительного мусора на свалках стоит довольно дорого, и отходы дешевле перерабатывать, чем вывозить. Поэтому застройщикам выгоднее тратить средства, время и усилия на переработку и утилизацию строительных отходов, чем на вывоз их на свалку [2, 3].

Европейский союз и национальные политики большинства европейских стран поощряют местные органы власти к сведению до минимума производства отходов строительства и сноса и к поиску путей создания альтернативной замены природным ресурсам. Это означает, что при их соответствии техническим требованиям использование рециклированных заполнителей является столь же допустимым, как и природных.

С целью сохранения окружающей среды в некоторых странах были созданы законы, обязывающие рецик-

The concrete world production is related to extraction, processing and use of about 20 billion tons of sand and rocks per year associated with dust and necessity of transport, which has a major impact on the environment. Therefore, the substitution of natural aggregates with different technogenic waste, including waste resulting from demolition of concrete structures, can significantly reduce this impact [1].

The global concrete industry currently produces over one billion tons of construction and demolition waste annually [2]. For example, a 5-storey building normally produces about 15000 tons of waste.

Such waste is usually transported to landfills. However, before reception of waste at landfills, many European countries require official evidence that this waste cannot be recycled. Storage of construction waste at landfills has a high cost, and recycling waste is less expensive than disposal. For this reason, spending money, time and efforts on processing construction waste is more beneficial for many developers than disposal at landfills [2, 3].

The European Union and national policies of most European countries are encouraging local authorities to minimize the production of construction and demolition waste and find ways to create replacement of natural resources. This means that recycled aggregates can be equally used like natural if they meet the technical requirements. In order to preserve the environment, some countries have established their laws obliging the recycling of construction material waste including concrete which can reduce the construction cost and preserve the forests and water in mountains.

\*Выражение признательности. Исследование, приведенное в статье, было финансировано Программой поддержки прикладных исследований в Ливанском университете.

\*Acknowledgement. The research reported in the article was funded by the Applied Research Support Program, Lebanese University.

лирование всех строительных отходов, в том числе бетона, реутилизация которого позволила бы уменьшить стоимость строительства и сохранить в первозданном виде леса и водные ресурсы в горах.

Рециклированный заполнитель представляет собой ценный ресурс. Его использование для замены природного заполнителя в бетоне может принести значительные энергетические и экологические преимущества. Производство и транспортировка природных заполнителей являются причиной выбросов, представляющих 0,0046 млн т углеродного эквивалента за каждую тонну природных заполнителей по сравнению с 0,0024 млн т углеродного эквивалента за тонну рециклированных заполнителей. С учетом мирового потребления 20 млрд т заполнителей в год для производства бетона замена природных на рециклированные заполнители сокращает выбросы. Это преимущество должно стать более значимыми с течением времени, поскольку истощение источников природных заполнителей навязывает поставки на большие расстояния, в то время как рециклированные заполнители обычно доступны поблизости [2].

Рециклирование бетона представляет собой одну из самых актуальных тем исследований в области материаловедения и науки об окружающей среде. Оно заключается в дроблении бетона, полученного в результате сноса старых конструкций, и просеивании полученных частиц и их дальнейшее использование в качестве заполнителей в новых бетонных смесях. Полученный заполнитель называется рециклированным заполнителем (РЗ), а новая бетонная смесь называется рециклированным бетоном (РБ). Повторное использование отходов бетонного камня во многих случаях весьма целесообразно и отвечает принципам концепции «устойчивого развития» («sustainable development»), основные положения которой предусматривают экономию материалов и энергии, повышение долговечности конструкций и уменьшение негативного воздействия на окружающую природу, в том числе сохранение невосполнимых источников природных ресурсов. Следует отметить, что в Великобритании, в частности, с целью сохранения природных ресурсов и стимулирования рециклинга введен налог на применение каждой тонны природного заполнителя (первичного сырья) в размере 1,6 фунта стерлингов [4].

Конечной целью рециклирования является вторичное использование отработанных строительных материалов или элементов конструкций для получения подобной продукции [5].

Исследования, проведенные в области рециклирования бетона, показали его значение в экономическом плане и для окружающей среды. Минимизация расходов на управление отходами (waste management) была основной целью для Германии. Таким образом, Германия оказалась первой страной, которая создала свои национальные рекомендации о рециклированном бетоне [6].

Рекомендации RILEM [7] содержат требования к свойствам рециклированного или вторичного заполнителя: по содержанию примесей, хлоридов, по гранулометрическому составу, средней плотности, водопоглощению, истираемости, прочности, морозостойкости и т. п.

Использование рециклированного заполнителя в бетонных смесях является предметом исследования ряда работ. В частности, работой [8] показали, что возможна замена части природного заполнителя рециклированным без значительной потери прочности бетона. Основным параметром, влияющим на прочность бетона при сжатии, является процентное содержание РЗ: чем выше их содержание, тем больше их отрицательное влияние на физико-механические свойства получаемого бетона.

Recycled aggregate represents a valuable resource. Using it as replacement of natural aggregate in concrete can give significant energy and environmental interests. Production and transport of natural aggregates generate emissions representing 0.0046 million tons of carbon equivalent for each ton of natural aggregates, compared to only 0.0024 million tons of carbon equivalent for each ton of recycled aggregates. Taking into account the world consumption of 20 billion tons of aggregates per year for concrete production, replacing natural aggregates with recycled aggregates reduces emissions which can have great benefits to environment. These benefits shall become more important over time because the depletion of natural resources imposes important distances for aggregates delivery, while recycled aggregates are usually available nearby [2].

Concrete recycling is one of the most important research topics in material and environmental sciences. It consists in crushing the concrete resulting from demolition of old structures and screening obtained particles and using them as aggregates in new concrete mixes. The resulting aggregate is called recycled aggregate (RA) and new concrete mixture containing recycled aggregate is called recycled concrete (RC). Reusing of concrete stone waste in many cases is very reasonable and complies with the principles of the concept of sustainable development, principal provisions of which consider materials and energy savings, increase of structures durability, and reduction of negative impact on the environment including conservation of irreplaceable sources of natural resources. It should be noted that in the UK, in particular, in order to preserve natural resources and promote recycling, each ton of natural aggregate (raw material) is taxed at a rate of 1.6 GBP [4].

The ultimate goal of recycling is the reuse of processed building materials or construction elements to obtain similar products [5].

Studies performed in the domain of concrete recycling have shown its economic and environmental significance. Minimizing expenses on construction waste management has been the main goal of Germany. Therefore, Germany became the first country that had established its national guidelines for concrete recycling [6].

RILEM recommendation [7] contains requirements for recycled or secondary aggregate properties related to the impurities content, chloride ion content, particle size distribution, density, water absorption, abrasion resistance, strength, frost resistance, etc.

The use of recycled aggregate in concrete mixes was the subject of a series of studies. Research results [8] have shown that it is possible to replace a part of natural aggregates with recycled aggregates without significant loss of concrete strength. The main parameter influencing the compressive strength of concrete is the content percentage of recycled aggregates: the higher their content, the greater their negative influence on the physico-mechanical properties of obtained concrete.

It has been proven [9–12] that recycled aggregates have a negative impact on the workability of concrete mixture and the porosity, density, strength and durability of concrete. Tests have shown that recycled aggregate has a higher water demand than natural due to the angularity, rough texture and porosity of its surface, caused by the attached cement paste of original concrete. Porosity and high water demand of recycled aggregates reduces the workability of concrete mixture and creates additional pores in hardened concrete, which negatively affects the durability of concrete and reduces its density and compressive strength.

Recycled aggregates can be effectively used in the manufacture of concrete wall blocks. Light concrete grey block is characterized by fine surface texture and high enough dura-

Было доказано [9–12], что РЗ оказывают негативное влияние на удобоукладываемость бетонной смеси и на пористость, среднюю плотность, прочность и долговечность бетона. Испытания показали, что РЗ имеет большую водопотребность, чем природный, что является результатом угловатости, грубой текстуры и пористости его поверхности, связанных с наличием на ней остатков растворной составляющей бетона. Пористость и высокая водопотребность приводят к снижению удобоукладываемости бетонной смеси, а также к образованию дополнительных пор в затвердевшем бетоне, что отрицательно влияет на долговечность бетона и способствует уменьшению его плотности и прочности при сжатии.

Рециклированные заполнители могут быть эффективно использованы в производстве стеновых бетонных блоков. Легкобетонный серый блок характеризуется мелкой поверхностной текстурой и достаточно высокой прочностью. Обычно бетонный блок весит от 10 до 16 кг. Бетонная смесь, используемая для производства таких блоков, содержит большее количество песка и меньшее количество щебня и воды, чем бетонные смеси, используемые для общестроительных работ. Таким образом, получается достаточно сухая смесь, при этом блок, получаемый при извлечении из формы, обладает хорошей формовочной прочностью. Кроме основных компонентов в бетонной смеси, которая используется для производства подобных блоков, могут содержаться различные химические добавки, необходимые для улучшения удобоукладываемости, регулирования процесса твердения и повышения прочности.

Исследования бетонных блоков [13] с РЗ показали, что их прочность несколько ниже прочности блоков на основе природных заполнителей. Основной причиной этой разницы является низкая плотность РЗ [13]. Установлено, что использование рециклированных заполнителей при введении дополнительного количества цемента позволяет производить бетонные блоки, имеющие характеристики, близкие по характеристикам к блокам с природными заполнителями. Согласно работам [14–16] средняя плотность блоков на основе РЗ снижается, а их водопоглощение увеличивается с увеличением содержания мелкозернистого рециклированного заполнителя, что обусловлено его более низкой плотностью по сравнению с речным песком.

Испытания [17] показали, что добавление цемента в количестве 10% по сравнению с обычно используемым его содержанием позволило производить бетонные стеновые блоки с прочностью, сопоставимой с прочностью бетонных блоков, изготовленных исключительно на основе природных заполнителей. На основании анализа экспериментальных данных было сделано заключение о нецелесообразности использования РЗ без природных, так как это связано с необходимостью увеличения количества цемента в целях достижения необходимой прочности, что отнюдь не экономично. Рекомендовано содержание РЗ в бетонной смеси не более 50% от общего объема заполнителей.

Возможно также получение стеновых блоков на основе стеклоотходов. Такие отходы являются одними из основных в объеме твердых бытовых отходов во многих странах [18]. Они могут быть представлены во многих формах, включая тарное (бутылки безалкогольных напитков и пива, фармацевтические стеклянные флаконы, упаковочные банки), плоское оконное, стекло ламп и электронно-лучевой трубки [19]. Переработка стеклобоя экономически выгодна и не требует больших энергетических затрат. Использование переработанного (рециклированного) стеклобоя в качестве высокоэффективной замены песка и заполнителей исследовалось на протяжении многих лет. Также

близость. Concrete block usually weighs from 10 to 16 kg. Concrete mixture used for the production of such blocks contains more sand and less gravel and water than concrete mixtures used for civil works. Therefore, the obtained mixture is dry enough, and block obtained after demolding has good mold hardness. In addition to the main components of concrete mixture used for producing such blocks, the mixture can contain different chemical additives required to improve the workability, control the hardening process and increase the strength.

Studies [13] have shown that strength of concrete blocks with recycled aggregate is slightly lower than strength of blocks with natural aggregates. The main reason for this difference is the low density of recycled aggregate. It has been found that the use of recycled aggregates with additional quantity of cement allows manufacturing concrete blocks with characteristics similar to those of blocks with natural aggregates [13]. According to [14–16] the density of blocks with recycled aggregates decreases and their water absorption increases with increasing content of fine recycled aggregate due to its lower density compared to river sand.

Research [17] has shown that adding 10% of cement compared to normally used cement content allows producing concrete wall blocks with strength comparable to the strength of concrete blocks containing only natural aggregates. Based on the analysis of experimental results it was concluded that it is not feasible to use recycled aggregates without natural aggregates because of the need of increasing the quantity of cement to reach the necessary strength which is not economical. It is recommended a content of recycled aggregates in concrete mixture no more than 50% of the total volume of aggregates.

It is also possible to obtain building blocks containing waste glass. Such waste is a major component of the solid waste stream in many countries [18]. It can be found in many forms including container glass (bottles of soft drinks and beer, pharmaceutical glass bottles, packing jars), flat glass as windows, glass tubes, bulb glass and cathode ray tube glass [19]. Cullet recycling is economically beneficial and does not require much energy. The use of recycled glass cullet as high-performance replacement of sand and aggregates was studied for many years. Cullet can be also used as backfilling of trenches for pipes and as aggregate in heavyweight concrete and asphalt concrete.

However, recycling of waste glass in construction is limited due to its negative effect. The main problems of the use of cullet as aggregate are the reduction or loss of strength caused by poor adhesion of cement stone to the smooth surface of glass, presence of sugar impurities on the glass container, alkali-silica reaction [20, 21]. However, there are a number of measures to avoid alkali-silica reaction damaging effects: grinding the glass to pass at least standard mesh size #50; adding mineral admixtures that can effectively suppress the reaction; coating the glass surface with zirconium; sealing the concrete to protect it from moisture; using a low-alkali cement [22].

It is also found that very finely ground glass has pozzolanic properties and, therefore, can be used both as partial cement replacement and filler [23, 24]. Partial cement replacement with milled glass allows increasing the strength and durability of concrete containing recycled aggregate [2] and, as indicated above, the ground glass can limit the alkali-silica reaction.

Research [20] has proved the benefits of using recycled glass as fine aggregate in combination with sand in concrete hollow blocks for internal non-load bearing walls (partitions). It has been shown that the quantity of water is critical in the process of manufacturing concrete hollow blocks. Dry mixtures remained in the mold, while for wet mixtures the top side of hollow block collapsed. Obtained test results for mixes with optimal water content have shown an increase of

стеклобой может быть применен в качестве засыпки траншей для труб и в качестве заполнителя в тяжелом и асфальтобетоне.

Однако утилизацию стеклоотходов в строительстве сдерживают их некоторые негативные воздействия. Основными проблемами при использовании стеклобоя в качестве заполнителя являются снижение или потеря прочности, обусловленные плохим сцеплением цементного камня с гладкой поверхностью стекла, наличие примесей сахаров, оставшихся на стеклянной таре, щелочно-силикатная реакция [20, 21]. Однако существует ряд подходов, позволяющих эффективно управлять последним воздействием. Способами, позволяющими нивелировать влияние щелочно-силикатной реакции, являются: измельчение стекла до прохождения по крайней мере через стандартную сетку № 50; покрытие поверхности стекла цирконием; использование цемента с низким содержанием щелочи; введение пуццолана с низким содержанием щелочи или добавление замедлителя схватывания; использование воздухоовлекающих добавок; снижение водосодержания; увеличение соотношения площади поверхности к объему стеклянных заполнителей [22].

Также установлено, что тонкомолотое стекло обладает пуццоланическими свойствами и поэтому может быть использовано в бетоне для частичной замены как цемента, так и наполнителей [23, 24]. Частичная замена цемента позволяет увеличить сопротивление и долговечность бетона, содержащего P3 [2], при этом, как указывалось выше, измельченное стекло может ограничить щелочно-силикатные реакции.

strength when increasing the quantity of recycled glass. This may be a manifestation of pozzolanic effect of cullet powder or influence of water/cement ratio (W/C). The optimal W/C of mixture containing a greater quantity of glass is lower than W/C of mixture with lower quantity of glass. The use of flat window glass waste for lightweight concrete hollow block decreases the W/C depending on the quantity of cullet in the mixture.

The aim of this research was to determine the influence of the content of recycled aggregates and cullet (fig. 1) used to manufacture concrete wall hollow blocks on their strength and fire resistance.

Recycled aggregates and cullet used in this study had particle sizes between 6.3 and 12.5 mm, and natural aggregates between 0 and 6.3 mm. To reduce the water demand of concrete mix and improve its workability, the superplasticizer Sika ViscoCrete-20 HE has been used.

In the research the following properties of aggregates has been determined: particle size distribution (ASTM C136/C136M), density, relative density (specific gravity) and water absorption (ASTM C127 and ASTM C128), dry unit weight (ASTM C29/C29M), content of material finer than 75 mm (ASTM C117), sand equivalent value of soils (ASTM D2419), acid soluble chloride content (BS EN 1744 P5), acid soluble sulfate content (BS EN 1744 P1), and potential alkali-silica reactivity (chemical method) (ASTM C289) (Table 1).

In order to establish the optimum composition of concrete with recycled aggregates and recycled glass, mixes were prepared (Table 2) with partial replacement (30%) of natural aggregates having particle sizes between 6.3 and 12.5 mm and

Таблица 1  
Table 1

Свойства заполнителя Properties of aggregate	Ед. изм. Unit	Природный заполнитель 0–6,3 мм Natural aggregate 0–6.3 mm	Природный заполнитель 6,3–12,5 мм Natural aggregate 6.3–12.5 mm	Рециклированный заполнитель 6,3–12,5 мм Recycled aggregate 6.3–12.5 mm	Рециклированное стекло 6,3–12,5 мм Recycled glass 6.3–12.5 mm
Объемная плотность Bulk dry specific gravity	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	2465	2659	2289	2500
Истинная плотность Bulk saturated surface dry (SSD) specific gravity	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	2558	2675	2424	2500
Кажущаяся плотность Apparent specific gravity	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	2715	2702	2646	2501
Средняя плотность в сухом состоянии Rodded dry unit weight	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	1990	–	1360	–
Водопоглощение Water absorption	%	3,7	0,6	5,9	0,1
Зерна менее 75 мм Material finer than 75-µm	%	17,6	0,7	0,1	–
Определение песчаных фракций (эквивалент песка) Sand equivalent value	%	29	–	–	–
Содержание кислоторастворимых хлоридов Acid-soluble chloride content	%	0,01	0,007	0,16	–
Содержание кислоторастворимых сульфатов Acid-soluble sulfate content	%	0,008	0,11	0,1	–
Щелочно-силикатная реактивность: Potential alkali-silica reactivity:					
Концентрация растворенного силиката Dissolved silica SC	ммоль/дм <sup>3</sup> mmole/l	2	1	4	–
Снижение щелочности Reduction in alkalinity RA	ммоль/дм <sup>3</sup> mmole/l	150	50	130	–
Заполнитель вреден/безвреден Innocuous / Potentially deleterious / Deleterious	–	Безвреден Innocuous	Безвреден Innocuous	Безвреден Innocuous	–

Исследования [20] доказали преимущества использования рециклированного стекла в качестве мелкозернистого заполнителя в сочетании с песком в бетонных пустотелых блоках для внутренних ненесущих стен (перегородок). Было показано, что количество воды в составе смеси имеет решающее значение для формирования бетонных пустотелых блоков. При недостатке воды смесь оставалась в форме, а при ее избытке – верхняя часть пустотелых блоков разрушалась. Полученные результаты при оптимальном водосодержании смеси показали повышение прочности при увеличении количества рециклированного стекла. Это может быть проявлением пуццоланического эффекта порошка стеклобоя или влияния водоцементного (В/Ц) соотношения. Оптимальное В/Ц смеси, содержащей большее количество стекла, ниже, чем В/Ц смеси с меньшим количеством стекла. При использовании отхода оконного стекла в легкобетонных пустотелых блоках В/Ц уменьшается в зависимости от количества стеклобоя.

Целью данной работы являлось определение влияния содержания рециклированных заполнителей и стеклобоя (рис. 1), используемых для получения пустотелых стеновых бетонных блоков, на их прочность и огнестойкость.

Рециклированные заполнители и стеклобой, используемые в исследованиях, имели зерна, соответствующие диапазону 6,3–12,5 мм, а природные заполнители – 0–6,3 мм. Для снижения водопотребности бетонной смеси и улучшения ее удобоукладываемости был использован суперпластификатор Sika ViscoCrete-20 HE.

В работе были определены следующие свойства заполнителей: гранулометрический состав (ASTM C136/C136M), процентное содержание песчаных фракций (эквивалент песка) (ASTM C2419), средняя плотность и водопоглощение (ASTM C127 и ASTM C128),



**Рис. 1.** Рециклированные материалы: *а* – рециклированный заполнитель; *б* – рециклированное стекло

**Fig. 1.** Recycled materials: *a* – recycled aggregate; *b* – recycled glass



**Рис. 2.** Испытание на сжатие

**Fig. 2.** Compression test



**Рис. 3.** Стеновой бетонный блок после разрушения

**Fig. 3.** Concrete wall block after failure

addition of superplasticizer Sika ViscoCrete-20 HE.

The composition of mixes varied as follows:

**Mix 1 (RA30):** 30% recycled aggregates (RA) with particle size 6.3–12.5 mm and 70% natural aggregates with particle size 0–6.3 mm.

**Mix 2 (RA20+RG10):** 20% recycled aggregates (RA) with particle size 6.3–12.5 mm, 10% recycled glass (RG) with particle size 6.3–12.5 mm and 70% natural aggregates with particle size 0–6.3 mm.

**Mix 3 (RA10+RG20):** 10% recycled aggregates (RA) with particle size 6.3–12.5 mm, 20% recycled glass (RG) with particle size 6.3–12.5 mm and 70% natural aggregates

**Таблица 2**  
**Table 2**

Компоненты бетонной смеси Constituents	Ед. изм. Unit	1	2	3	4	5
		P3/30 RA30	P3/20+PC/10 RA20+RG10	P3/10+PC/20 RA10+RG20	PC/30 RG30	ПЗ NA
Цемент Cement	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	144	144	144	144	144
Природные заполнители 0–6,3 мм Natural aggregates 0–6.3 mm	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	1508	1508	1508	1508	1508
Природные заполнители 6,3–12,5 мм Natural aggregates 6.3–12.5 mm	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	645
Рециклированные заполнители 6,3–12,5 мм Recycled aggregates 6.3–12.5 mm	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	645	430	215	0	0
Рециклированное стекло 6,3–12,5 мм Recycled glass 6.3–12.5 mm	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	0	215	430	645	0
Вода Water	л/м <sup>3</sup> l/m <sup>3</sup>	144	144	144	144	144
Суперпластификатор Sika ViscoCrete-20 HE Superplasticizer Sika ViscoCrete-20 HE	л/м <sup>3</sup> l/m <sup>3</sup>	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19

содержание кислоторастворимых хлоридов (BS EN 1744 P5), содержание кислоторастворимых сульфатов (BS EN 1744 P1), их щелочно-силикатная реактивность (химическим методом) (ASTM C289), плотность в сухом состоянии (ASTM C29/C29M) (табл. 1).

В целях установления оптимального состава бетонов с РЗ и стеклосодержащими были изготовлены смеси (табл. 2) с частичной заменой (30%) природных заполнителей фракции 6,3–12,5 мм и суперпластификатором Sika ViscoCrete-20 HE.

Состав смесей варьировался следующим образом.

**Смесь 1 (РЗ/30):** рециклированные заполнители (РЗ) фракции 6,3–12,5 мм – 30% и природные заполнители фракции 0–6,3 мм – 70%.

**Смесь 2 (РЗ/20+РС/10):** РЗ фракции 6,3–12,5 мм – 20%; рециклированное стекло (РС) фракции 6,3–12,5 мм – 10% и природные заполнители фракции 0–6,3 мм – 70%.

**Смесь 3 (РЗ/10+РС/20):** РЗ фракции 6,3–12,5 мм – 10%; РС фракции 6,3–12,5 мм – 20% и природные заполнители фракции 0–6,3 мм – 70%.

**Смесь 4 (РС/30):** РС фракции 6,3–12,5 мм – 30% и природные заполнители фракции 0–6,3 мм – 70%.

**Смесь 5 (ПЗ)** (контрольная смесь, не содержащая рециклированных материалов): природные заполнители фракции 0–12,5 мм – 100%.

Испытания производились на образцах размером 40×15×20 см, изготовленных методом вибропрессования и разформованных через несколько секунд после бетонирования. Хранение образцов осуществлялось в течение 7 сут при температуре 20±1°C и относительной влажности воздуха 95±5%.

Определение предела прочности при сжатии (рис. 2) производилось в соответствии с методами, описанными в стандартах Американского общества по испытанию материалов (ASTM). Приложение нагрузки производилось с постоянной скоростью 3 кН/с. На рис. 3 показан бетонный блок после разрушения. Исследования плотности производили по стандартной методике.

Для изучения поведения блоков в условиях пожара был использован нестандартный метод испытаний. С целью определения воздействия огня на внешний вид блока его поверхность подвергалась в течение двух часов воздействию открытого пламени, созданного горением бутана.

Полученные значения плотности и прочности блоков приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Анализ результатов показал, что все блоки имеют среднюю плотность в диапазоне 2496–2622 кг/м<sup>3</sup>. Все блоки, содержащие рециклированные заполнители и/или рециклированное стекло, имеют плотность ниже, чем у контрольных образцов. Блоки, не содержащие рециклированных материалов, имеют самую высокую прочность при сжатии – 3,66 МПа.

Блоки, содержащие разные комбинации рециклированных материалов, характеризуются следующей прочностью: Смесь 1 – 2,9 МПа; Смесь 2 – 2,86 МПа; Смесь 3 – 2,77 МПа; Смесь 4 – 2,75 МПа. Потери прочности при сжатии по сравнению с контрольными образцами составили 21, 22, 24 и 25% соответственно.

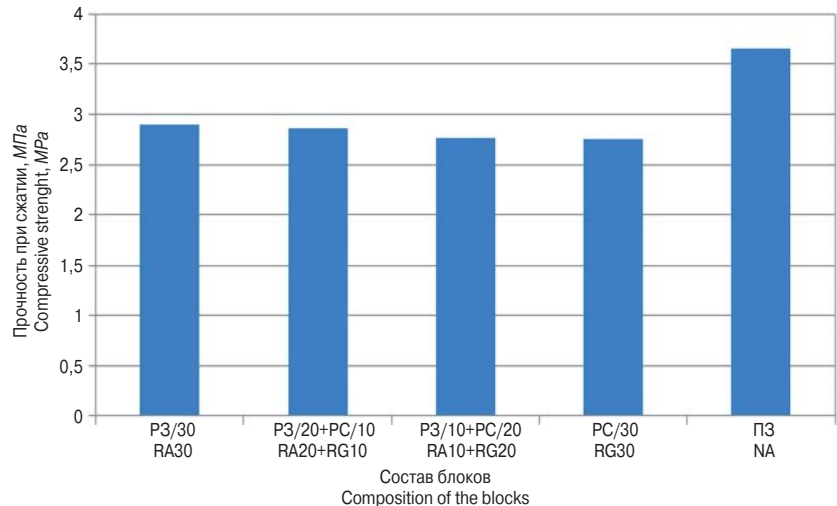


Рис. 4. Сравнительный анализ прочности блоков различного состава

Fig. 4. Comparative analysis of strength of blocks with different compositions

Таблица 3  
Table 3

Свойства Properties	Ед. изм. Unit	1	2	3	4	5
		P3/30 RA30	P3/20+PC/10 RA20+RG10	P3/10+PC/20 RA10+RG20	PC/30 RG30	ПЗ NA
Плотность Density	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	2593	2513	2521	2590	2629
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	32	15	12	3	31
Предел прочности при сжатии Compressive strength	МПа MPa	2,9	2,86	2,77	2,75	3,66
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	МПа MPa	0,33	0,23	0,22	0,32	0,53

with particle size 0–6.3 mm.

**Mix 4 (RG30):** 30% recycled glass (RG) with particle size 6.3–12.5 mm and 70% natural aggregates with particle size 0–6.3 mm.

**Mix 5 (NA)** (reference mix did not contain recycled materials): 100% natural aggregates with particle size 0–12.5 mm.

Tests were performed on specimens 40×15×20 cm manufactured using vibro-compaction method and demolded a few seconds after casting. Specimens were stored during 7 days at a temperature of 20±1°C and relative humidity 95±5%.

The compressive strength (fig. 2) was determined in accordance with the methods described in the standards of American Society for Testing and Materials (ASTM). The load was applied with a constant speed of 3 kN/s. The fig. 3 shows a concrete block after failure. Blocks density was also determined using standard methods.

The study of blocks behavior in fire has been performed using a non-standard test method. To determine the effects of fire on block appearance, the block surface was exposed during two hours to open flame created by burning butane. The analysis of test results (Table 3) has shown, that all blocks have a density between 2496 and 2622 kg/m<sup>3</sup>. All blocks containing recycled aggregates and/or recycled glass have densities lower than those of reference specimens. Blocks not containing recycled materials have the highest compressive strength: 3.66 MPa (fig. 4).

Blocks containing different combinations of recycled materials are characterized by the following strength: Mix 1

Испытания в условиях пожара показали, что через 5–15 мин воздействия огня на поверхности блоков появляются мелкие трещины шириной менее 1 мм, а по истечении двух часов никаких повреждений не наблюдалось.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования отходов строительства для получения пустотелых стеновых блоков. Замена 30% природных заполнителей на рециклированные снижает прочность блоков на 21–25%. Используя различные комбинации рециклированных заполнителей и стекла для замены природных заполнителей до 30%, можно производить бетонные блоки с прочностью, близкой к 2,82 МПа. Частичная замена заполнителей не влияет на поведение блоков в условиях пожара. Рециклированный бетон и рециклированное стекло могут быть использованы в качестве заполнителей при производстве пустотелых стеновых легкобетонных блоков.

**Список литературы / References**

1. Трамбовецкий В.П. Новые подходы к технологии бетона и перспективы ее развития // *Технологии бетонов*. 2013. № 4. С. 37–39.  
Trambovetskiy V.P. New approaches to technology of concrete and prospect of its development. *Tekhnologii betonov*. 2013. No. 4, pp. 37–39. (In Russian).
2. Nassar R., Soroushian P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*. 2012. No. 29, pp. 368–377.
3. Проблема утилизации строительных отходов в России // *Экопрогресс*. Электронный журнал. [http://ecoprogress.pro/econews/latest-issue/actual/actual\\_409.html](http://ecoprogress.pro/econews/latest-issue/actual/actual_409.html) (дата обращения 06.11.2015).  
Problem of recycling of construction waste in Russia. *Ekoprogress*. Electronic journal. [http://ecoprogress.pro/econews/latest-issue/actual/actual\\_409.html](http://ecoprogress.pro/econews/latest-issue/actual/actual_409.html) (date of access 06.11.2015). (In Russian).
4. Leshchinsky A., Lesinskij M. Concrete aggregate from construction and demolition waste. *BFT International*. 2003. No. 8, pp. 14–22.
5. Hendricks C.F., Pietersen H.S. Concrete: Durable, but also sustainable? *Proceedings of the International Symposium “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*. London. 11–12 November 1998, pp. 1–18.
6. Roos F., Zilch K. Verification of the dimensioning values for concrete with recycled concrete aggregate. *Proceedings of the International Symposium “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*. London. 11–12 November 1998, pp. 309–319.
7. RILEM TC 121-DRG: Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry – Specifications for concrete with recycled aggregates – RILEM recommendation. *Materials and Structures*. 1994. No. 27, pp. 557–559.
8. El Dalati R., Matar P. On the road to get structural recycled concrete. *Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)*. 2011. Vol. 42. No. 5, pp. 398–402.
9. Poon C.S., Lam C.S. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of precast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites*. 2008. No. 30, pp. 283–289.
10. Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*. 2011. No. 25, pp. 69–80.
11. Rao A., Jha K.N., Misra S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete.

– 2.9 MPa, Mix 2 – 2.86 MPa, Mix 3 – 2.77 MPa, Mix 4 – 2.75 MPa. The loss of compressive strength is respectively 21, 22, 24 and 25% compared to control specimens.

Block testing in fire has shown that after 5 to 15 minutes exposition of blocks to fire, small cracks of less than 1 mm width have appeared on the surface of blocks, and after two hours no damage was observed.

Therefore, performed study has shown the possibility of using construction waste to obtain wall hollow blocks. A 30% replacement of natural aggregates with recycled aggregates and/or recycled glass reduces the strength of blocks by 21 to 25%. Using different combinations of recycled aggregates and glass to replace up to 30% of natural aggregates allows producing concrete blocks with strength close to 2.82 MPa. Partial replacement of natural aggregates does not affect the behavior of blocks in fire. Recycled concrete and recycled glass can be used as aggregates in the production of concrete wall hollow blocks.

12. Nealen A., Schenk S. The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties. *Darmstadt Concrete – Annual Journal*. 1998. Vol. 13, pp. 322–336.
13. Pimienta P., Tran T., Delmotte P., Colombard-Prout M. Recycled aggregate used for making building blocks. *Proceedings of the International Symposium “Sustainable Construction – Use of Recycled Concrete Aggregate”*. London. 11–12 November 1998, pp. 297–307.
14. Poon C.S., Kou S.C., Wan H.W., Etxeberria M. Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*. 2009. No. 29, pp. 2369–2377.
15. Xiao Z., Ling T.C., Kou S.C., Wang Q., Poon C.S. Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks. *Waste Management*. 2011. No. 31, pp. 1859–1866.
16. Kou S.C., Zhan B.J., Poon C.S. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*. 2012. No. 36, pp. 566–571.
17. Matar P., El Dalati R. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. *Physics Procedia*. 2011. No. 21, pp. 180–186.
18. Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30. No. 1, pp. 91–100.
19. Liang H., Zhu H., Byars E.A. Use of waste glass as aggregate in concrete. *7<sup>th</sup> UK Care Annual General Meeting*. UK Chinese Association of Resources and Environment. 2007. Greenwich. 15 September 2007, pp. 1–7.
20. Ucol-Ganiron T.Jr. Recycled window glass for non-load bearing walls. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 2012. Vol. 3. No. 6, pp. 725–730.
21. Clean Washington Center (CWC). Best practices in glass recycling: Recycled glass in Portland cement concrete. November 1996, pp. 1–2.
22. Meyer C., Egosi N., Andela C. Concrete with waste glass as aggregate. *Proceedings of the International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee “Recycling and Re-use of Glass Cullet”*. 19–20 March 2001. 9 p.
23. Lee J. Utilization of solid wastes as aggregates in concrete. *Journal of Waste Glass and Rubber Particles*. 2003. Vol. 3, pp. 123–134.
24. Somayaji S. *Civil Engineering Materials*. New York: Pearson Education. 2001. 351 p.