

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327.002.3

С.В. САМЧЕНКО, В.В. ВОРОНИН, О.А. ЛАРСЕН, В.В. НАРУТЬ

САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН С КОМПЕНСИРОВАННОЙ УСАДКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БЕТОННОГО ЛОМА

Приводятся данные о разработке состава безусадочного самоуплотняющегося бетона на материалах из бетонного лома – щебня фракции 5–10 мм и микронаполнителя, полученного в результате механохимической активации отсева дробления щебня. Показана возможность эффективного применения щебня из дробленого бетона и отсева его дробления в качестве исходных материалов для самоуплотняющегося бетона. Предварительно подобранный состав бетона оптимизирован введением расширяющей добавки РД-Н. Установлено, что ее введение способствует изменению состава цементного камня, а компенсация усадки достигается за счет повышенного образования этtringита. Приведены результаты исследования, показывающие, что оптимизация состава самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома путем введения расширяющей добавки ведет к увеличению физико-механических и деформационных характеристик бетона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: самоуплотняющийся бетон, бетонный лом, щебень из дробленого бетона, отсев дробления, микронаполнитель, расширяющая добавка РД-Н.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78

Введение. В настоящее время переработка большого объема железобетонного и бетонного лома, образующегося в ходе демонтажных работ по реновации, является актуальной задачей. При рациональном подходе к сортировке бетона и железобетона, включающем удаление первичных примесей в виде инородных включений, распределении изделий по номенклатуре и видам, последующей переработке на дробильно-сортировочных комплексах возможно получить качественный вторичный щебень различных фракций и отсев его дробления [1]. Ввиду присутствия не до конца прогидратированных зерен цемента в отсеве дробления [2] для повышения эффективности его использования данный отсев необходимо активировать различными способами с целью получения микронаполнителей [3–5].

Щебень из дробленого бетона и микронаполнитель рационально применять в качестве сырьевых компонентов для производства различных видов

бетона, в том числе самоуплотняющегося. Подбор состава самоуплотняющегося бетона имеет свои особенности: ограничение крупности заполнителей, повышенное содержание тонкодисперсных компонентов, применение суперпластификаторов с высокими водоредуцирующими показателями [6–8] и т.д. Поэтому для получения самоуплотняющихся бетонов на основе бетонного лома необходимо применение щебня из дробленого бетона мелкой фракции – 5–10 или 3–10 мм и микрозаполнителя, что повысит технико-экономическую эффективность утилизации лома.

Поскольку самоуплотняющийся бетон без использования различных методов уплотнения растекается и уплотняется, его применение ведет к увеличению производительности труда, а также улучшению производственной обстановки из-за уменьшения шума. Вместе с тем самоуплотняющийся бетон имеет ряд недостатков, в том числе повышенную усадку [9], неизбежно возникающую при твердении вяжущего на основе портландцемента. При увеличенной деформации усадки нередко появляются различные трещины, которые приводят к ухудшению физико-механических свойств бетона и возникновению проницаемости конструкции, уменьшая ее деформативность и долговечность [10].

Одним из приемов, позволяющих компенсировать усадку бетона, является введение оптимального количества различных расширяющих добавок. По вещественному составу расширяющие добавки условно можно разделить на оксидные, алюминатно-оксидные и алюминатно-сульфатные [11, 12].

В портландцементе при введении расширяющих оксидных добавок расширение происходит за счет гидратации оксидов кальция, магния (CaO , $\text{MgO}_{\text{св}}$) и др. В алюминатно-оксидных добавках, помимо гидратации оксидов, также образуются алюминатные и сульфатные соединения, вызывающие расширение. Наибольшее распространение получили алюминатно-сульфатные добавки, при введении в портландцемент которых в результате затворения водой и взаимодействия компонентов системы образуется этtringит [13].

Механизм всех расширяющих добавок заключается в увеличении при гидратации твердой фазы цементного камня. Следует отметить, что при повышенном содержании расширяющего компонента и ограничении деформаций возникает самонапряжение бетона.

Цель работы заключалась в получении безусадочного самоуплотняющегося бетона на материалах из бетонного лома с оптимальным количеством расширяющей добавки, позволяющей компенсировать деформации, возникающие из-за усадки.

В работе применялись следующие материалы:

портландцемент ЦЕМ I 42,5Б, ПАО «Мордовцемент», соответствующий ГОСТ 31108–2016;

мелкий песок I класса с модулем крупности $M_k = 1,8$ и содержанием пылевидных и глинистых частиц в количестве 0,9 % по ГОСТ 8736–2014 производства ЗАО «Мансуровское карьероуправление»;

суперпластификатор Sika Visco Crete E55 (SVC E55), ТУ 2493-009-13613997–2011 производства «Зика»;

вода водопроводная;

бетонный лом внутренней стеновой панели 9BC1 жилого дома 1605/AM-5, демонтированного в микрорайоне Кунцево по программе реновации г. Москвы.

Бетонный лом подвергался лабораторной переработке, включающей в себя первичное дробление крупных кусков, удаление арматурных элементов, вторичное дробление в цилиндре диаметром 150 мм, рассев, компоновку щебня фракции 5–10 мм по ГОСТ 32495–2013. В результате дробления образуется большое количество отсева, достигающее до 40 %. Данный отсев подвергался механохимической активации в вибромельнице совместно с сухим поликарбоксилатным пластификатором Melflux 5581F в количестве 0,5 % от массы отсева при активации в течение 150 мин. Результатом этого служило получение микронаполнителя (МН), который являлся частью композиционного вяжущего для самоуплотняющегося бетона. Оптимальное содержание микронаполнителя в композиционном вяжущем составило 22 % от массы портландцемента [14].

РД-Н представляет собой сухую тонкоизмельченную смесь минерального состава, %: полуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – 41,8; кролит CaAl_2O_4 – 21,4; алит C_3S – 7,4; белит C_2S – 3,2; четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF – 3,7; доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ – 7,3; майенит $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ – 2,3; кварц SiO_2 – 1,2; двуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 1,7; аморфная фаза – 10.

Химический состав РД-Н представлен оксидами, %: CaO – 39,8; SO_3 – 22,1; Al_2O_3 – 17,8; SiO_2 – 10; Fe_2O_3 – 6,1; MgO – 2,3; TiO_2 – 0,8; SrO – 0,5; K_2O – 0,4; Na_2O – 0,09; ост. – 0,11.

Содержание работы. В работе оптимизировался состав самоуплотняющегося бетона (СУБ) на основе бетонного лома, содержащего, кг/м^3 : Ц – 477; МН – 135; П – 684; Щ – 583; SVC E55 – 2,14; В – 232.

Оптимизация состава осуществлялась за счет введения расширяющейся добавки РД-Н в самоуплотняющуюся бетонную смесь на стадии приготовления. Количество добавки РД-Н в составе бетона варьировалось от 10 до 12 % от массы вяжущего. Известно, что самоуплотняющиеся бетоны отличаются высоким расходом вяжущего. В данном исследовании его расход составил 612 кг/м^3 . После распалубки образцов определялась усадка самоуплотняющегося бетона по ГОСТ 24544–81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести». Результаты представлены на рис. 1. Установлено оптимальное количество РД-Н, которое составило 11 % от массы вяжущего.

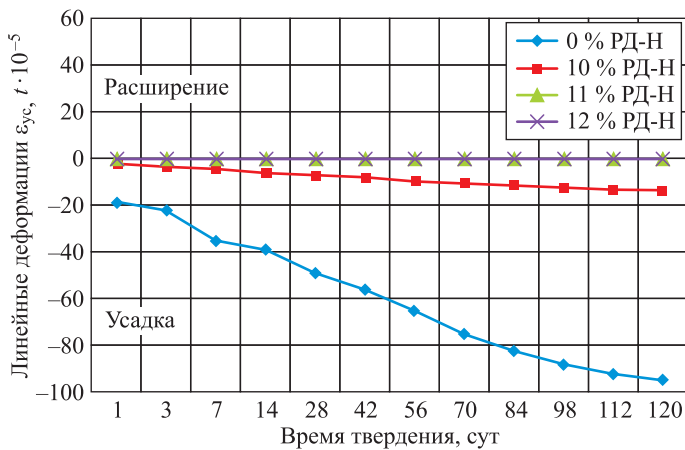


Рис. 1. Линейные усадочные деформации самоуплотняющегося бетона с расширяющей добавкой РД-Н

Таблица 1. Минералогический состав цементного камня, %

Минерал	Состав	
	исходный	оптимизированный
Кварц SiO_2	53,1	41
Кальцит CaCO_3	16,1	24,5
Микроклин KAlSi_3O_8	6	5,7
Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	6,4	6
Доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	2	2,3
Алит C_3S	1,3	3,2
Белит C_2S	1,1	1,6
Трехкальциевый алюминат C_3A	–	0,7
Четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF	1,3	1,7
Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$	1,5	1,2
Ангидрит CaSO_4	0,6	0,5
Этtringит $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	0,6	1,6
Аморфная фаза	10	10

При таком минимальном количестве добавки обеспечивается отсутствие линейных усадочных деформаций.

Методом РФА установлен фазовый состав цементного камня исходного и оптимизированного самоуплотняющегося бетона, который представлен в табл. 1 и на рис. 2.

Установлено изменение минералогического состава цементного камня в оптимизированном составе. Зафиксировано уменьшение количества кварца на 12,1 %, микроклина на 0,3, альбита на 0,4, портландита на 0,3 % при одновременном увеличении кальцита на 8,4 %, алита на 1,9, белита на 0,5, трехкальциевого алюмината 0,7, четырехкальциевого алюмоферрита на

Таблица 2. Свойства самоуплотняющихся бетонов на основе бетонного лома

Показатель	Состав	
	исходный	оптимизированный
Прочность на сжатие, МПа		
3 сут	19,8	21,9
7 сут	34,4	38,3
28 сут	42,1	47,2
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	4,14	4,84
Трещиностойкость K_c , $\text{Мн}/\text{м}^{3/2}$	9,45	10,22
Модуль упругости E_0 , МПа	25480	27300
Коэффициент Пуассона μ	0,21	0,2
Истираемость, $\text{г}/\text{см}^2$	0,5	0,4

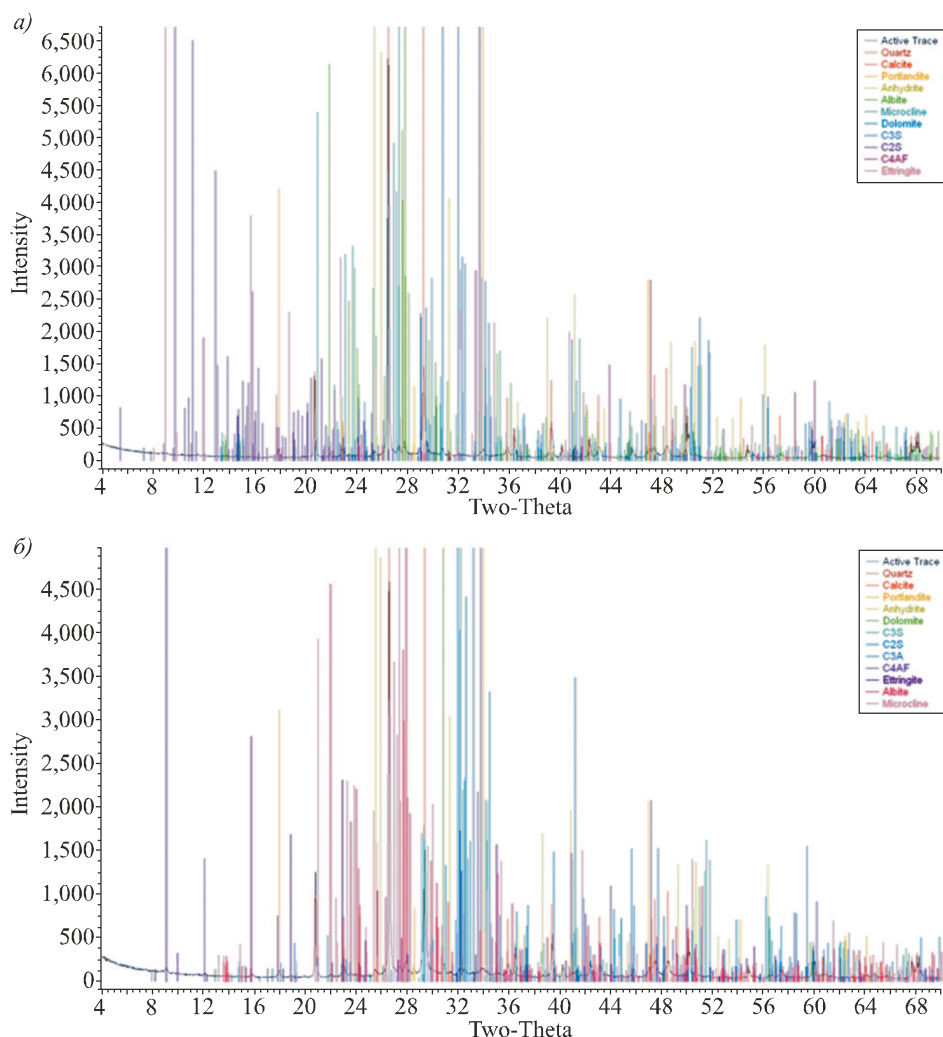


Рис. 2. Рентгенограмма цементного камня исходного (а) и оптимизированного состава СУБ (б)

0,4 %. В цементном камне оптимизированного состава выявлено повышенное содержание этtringита, превышающее его содержание в оптимизированном составе в 1,6 раза и способствующее компенсации усадочных деформаций самоуплотняющегося бетона.

Проведены сравнительные испытания прочностных свойств исходного и оптимизированного состава самоуплотняющегося бетона (табл. 2).

Выводы. 1. Правильная организация процесса переработки железобетонного и бетонного лома позволяет получать качественные вторичные материалы – щебень из дробленого бетона и отсев дробления. Отсев дробления целесообразно подвергать активации для получения тонкодисперсного микронаполнителя. Данные материалы рационально использовать для производства различных видов бетонов, в том числе самоуплотняющихся.

2. Самоуплотняющиеся бетоны на материалах из бетонного лома целесообразно оптимизировать с целью исключения усадочных деформаций, возникающих на стадии твердения.

3. Одним из способов получения безусадочного самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома является введение компенсатора усадочных деформаций в виде расширяющей добавки РД-Н. Установлено, что оптимальное количество РД-Н составляет 11 % от массы вяжущего, это минимальное количество расширяющей добавки, при котором не наблюдается усадки.

4. Показано, что компенсация усадки в самоуплотняющемся бетоне с РД-Н осуществляется за счет образования этtringита. Установлено различие в фазовом составе цементного камня самоуплотняющегося бетона при введении РД-Н.

5. Исследованиями установлено, что введение на стадии приготовления оптимального количества РД-Н в самоуплотняющуюся бетонную смесь обеспечивает повышение физико-механических показателей: прочности на сжатие на 12,1 %, прочности на растяжение при изгибе на 16,9, истираемости на 25, трещиностойкости на 8,2 %. Путем оптимизации увеличены деформационные показатели самоуплотняющегося бетона: модуль упругости на 7,1 %, коэффициент Пуассона на 5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 2. С. 61–66.
2. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Наномодифицированные бетоны. М.: Изд-во АСВ, 2017. 198 с.
3. Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Абдуллаев М.А.-В., Хасиев А.А. Использование механоактивированных отсеков дробления бетонного лома в производстве бетонокомпозитов // Вестн. Дагестан. гос. техн. ун-та. Техн. науки. 2011. № 22. С. 136–140.
4. Ren P., Li B., Yu J.-G., Ling T.-C. Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 267. P. 122115.
5. Oh D., Noguchi T., Kitagaki R., Choi H. Proposal of demolished concrete recycling system based on performance evaluation of inorganic building materials manufactured from waste concrete powder // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 135. P. 110147.
6. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. No. 1. P. 5–15.
7. Несветаев Г.В., Лопатина Ю.Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и ее растворной составляющей // Науковедение. 2015. Т. 7, № 5. С. 1–14.
8. Samchenko S., Krivoborodov Yu. Improving crack resistance of concrete when using expanding cements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. PaperID 022039.
9. Carballosa P., Garcia Calvo J.L., Revuelta D., Sanchez J.J., Gutierrez J.P. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. P. 223–229.
10. Несветаев Г.В., Халезин С.В. О прочности бетона с каркасной структурой // Науковедение. 2015. Т. 7, № 3. С. 1–10.

11. *Титова Л.А., Бейлина М.И.* Расширяющие добавки для бетонов нового поколения // Бетон и железобетон. 2001. № 4. С. 24–27.
12. *Звездов А.И., Титов М.Ю.* Бетон с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности // Бетон и железобетон. 2001. № 4. С. 17–20.
13. *Шейкин А.Е., Якуб Т.Ю.* Безусадочный портландцемент. М.: Стройиздат, 1966. 103 с.
14. *Наруть В.В., Ларсен О.А.* Самоуплотняющиеся бетоны на основе бетонного лома сносимых жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 52–58.

Самченко Светлана Васильевна, д-р техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Воронин Виктор Валерианович, д-р техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Ларсен Оксана Александровна, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Наруть Виталий Викторович, асп.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 19.01.2021

Samchenko Svetlana Vasilyevna, DSc, Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Voronin Viktor Valerianovich, DSc, Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Larsen Oksana Aleksandrovna, PhD, Ass. Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Naruts Vitaliy Viktorovich, Post-graduate Student

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

SELF-COMPACTING CONCRETE WITH COMPENSATED SHRINKAGE BASED ON RECYCLED CONCRETE MATERIALS

The article presents the results of design of self-compacting concrete with compensated shrinkage based on recycled concrete. In this research the coarse aggregate with fraction 5–10 mm and recycled concrete powder obtained by mechano-chemical activation of concrete screening were used. The concrete composition was optimized by the use of expansive additive. It was found that the use of expansive additive changes the phase composition of hardened cement and compensates the shrinkage of concrete due to the increased formation of ettringite. The influence of expansive additive on strength properties and deformation characteristics of concrete was established.

Key words: self-compacting concrete, concrete waste, recycled concrete aggregate, waste concrete powder, microfiller, expansive additive RD-N.

REFERENCES

1. *Larsen O.A., Naruts V.V., Voronin V.V.* Tekhnologiya pererabotki betonnoogo loma s tsel'yu polucheniya samouplotnyayushchegosya betona [The technology of recycling concrete waste with the aim of obtaining self-compacting concrete]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. 2020. No. 2. Pp. 61–66. (in Russian)

2. *Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V.* Nanomodifitsirovannyye betony [Nanomodified concretes]. Moscow, 2017. 198 p. (in Russian)
3. *Murtazaev S.-A.Yu., Saydumov M.S., Abdullaev M.A.-V., Hasiev A.A.* Ispol'zovanie mekhanoaktivirovannykh otsevov drobleniya betonnoy loma v proizvodstve betonokompozitov [The use of mechano-activated screenings for crushing concrete scrap in the production of concrete composites]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences]. 2011. No. 22. Pp. 136–140. (in Russian)
4. *Ren P., Li B., Yu J.-G., Ling T.-C.* Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks. Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 267. P. 122115.
5. *Oh D., Noguchi T., Kitagaki R., Choi H.* Proposal of demolished concrete recycling system based on performance evaluation of inorganic building materials manufactured from waste concrete powder. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 135. P. 110147.
6. *Okamura H., Ouchi M.* Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. No. 1. Pp. 5–15.
7. *Nesvetaev G.V., Lopatina Yu.Yu.* Proektirovaniye makrostruktury samouplotnyayushchey betonnoy smesi i eye rastvornoy sostavlyayushchey [Designing the macrostructure of self-compacting concrete mix and its mortar component]. Naukovedeniye [Science]. 2015. Vol. 7, No. 5. Pp. 1–14. (in Russian)
8. *Samchenko S., Krivoborodov Yu.* Improving crack resistance of concrete when using expanding cements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. PaperID 022039.
9. *Carballosa P., Garcia Calvo J.L., Revuelta D., Sanchez J.J., Gutierrez J.P.* Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 223–229.
10. *Nesvetaev G.V., Halezin S.V.* O prochnosti betona s karkasnoy strukturoy [About the strength of concrete with a frame structure]. Naukovedeniye [Science]. 2015. Vol. 7, No. 3. Pp. 1–10. (in Russian)
11. *Titova L.A., Beylina M.I.* Rasshiryayushchiye dobavki dlya betonov novogo pokoleniya [Expansive additives for new generation concrete]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2001. No. 4. Pp. 24–27. (in Russian)
12. *Zvezdov A.I., Titov M.Yu.* Beton s kompensirovannoy usadkoy dlya vozvedeniya treshchinostoykikh konstruktsiy bol'shoy protyazhennosti [Compensated shrinkage concrete for the construction of long-range crack-resistant structures]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2001. No. 4. Pp. 17–20. (in Russian)
13. *Sheykin A.E., Yakub T.Yu.* Bezusadochnnyy portlandtsement [Non-shrinkage cement]. Moscow, Stroyizdat, 1966. 103 p. (in Russian)
14. *Naruts V.V., Larsen O.A.* Samouplotnyayushchiyya betony na osnove betonnoy loma snosimyykh zhilykh zdaniy [Self-compacting concrete based on recycled concrete of demolished residential buildings]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2020. No. 2. Pp. 52–58. (in Russian)