

ШЛАКОЩЕЛОЧНЫЕ БЕТОНЫ С РЕЗИНОВОЙ КРОШКОЙ ИЗ ИЗНОШЕННЫХ АВТОШИН ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

© О. М. Смирнова¹, Л. Ф. Казанская²

¹СПбГУ, Санкт Петербург, Россия

²ПГУПС Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Разработаны новые композиты гидратационного твердения и технология переработки вторичных ресурсов при использовании фракционированной резиновой крошки из изношенных автошин с установленной фракцией. Проанализированы требования к изделиям и конструкциям, применяемым в дорожном строительстве. Использование фракционированной, резиновой крошки позволяет изменять пористость композита и за счет этого повышать звукопоглощающие свойства, ударную прочность. Получена диаграмма деформирования в осях «нагрузка-прогиб» для образцов с резиновой крошкой. Установлено, что при использовании резиновой крошки в составе шлакощелочного бетона изменяется характер разрушения, отсутствует хрупкое разрушение, возрастает удельная работа разрушения. Предел прочности при сжатии и изгибе снижается при использовании резиновой крошки. Однако увеличение удельной работы разрушения позволяет рассматривать разработанный композит для применения в деформируемых конструкциях.

Ключевые слова: шлакощелочные вяжущие, молотый гранулированный доменный шлак, звукопоглощение, ударная прочность, устойчивое развитие.

Вопросы охраны окружающей среды за счет разработки технологий использования вторичных ресурсов в транспортном строительстве приобретают особую актуальность, поскольку объемы использования цементных бетонов являются высокими [5, 6]. Цементные бетоны составляют значительную долю в общем объеме материалов, применяемых в транспортном строительстве, соответственно вовлечение вторичных ресурсов улучшит экологическую обстановку [1, 2, 4], а также позволит получить композиты с новыми или улучшенными свойствами [12-15].

В настоящее время исследования направлены на получение бесклнкерных цементов на основе побочных продуктов промышленности, в том числе шлакощелочных вяжущих [7, 8-11]. Продукты гидратации этих вяжущих отличаются химическим и минералогическим составом от продуктов гидратации портландцемента, а также структурой камня на микро- и наноуровне и, соответственно, свойствами [16-20]. Экспериментально и теоретически

доказано значительное повышение морозостойкости шлакощелочного бетона за счет снижения капиллярной пористости [17]. Имеется опыт применения шлакощелочных цементов на основе гранулированных доменных шлаков в транспортном строительстве в сложных условиях эксплуатации, например, в подрельсовых конструкциях, а также в напольных конструкциях животноводческих ферм [11, 17]. Это позволяет изучить использование шлакощелочных цементов в составах композитов с резиновой крошкой из изношенных автошин.

Общеизвестно, что использование резиновой крошки в составах цементных композитов приводит к снижению прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе. Отсюда, применение резиновой крошки возможно в строительных изделиях, для которых эти характеристики важны, но не являются первостепенными. В связи с этим авторами проанализированы требования к изделиям и конструкциям, применяемым в дорожном строительстве. Согласно ГОСТ 33127 «Автомобильные доро-

Таблица 1

Химический состав шлака

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	S	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
41,0	7,5	43,0	6,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,5	0,9

ги общего пользования. Ограждения дорожные. Классификация боковые удерживающие ограждения подразделяют на два подкласса: недеформируемые (часть энергии удара гасится за счет подъема транспортного средства, уменьшающего опрокидывающий момент) и деформируемые (часть энергии удара гасится за счет деформации материала в конструкции и трения в конструкции). По принципу работы боковые удерживающие ограждения подразделяют на несколько типов, один из которых – боковые барьерные ограждения. В таких ограждениях энергия удара гасится за счет преимущественно изгибной деформации материала конструкций.

Целью работы является изучение влияния резиновой крошки на ударную прочность, звукопоглощение и предел прочности при сжатии и изгибе шлакощелочного бетона.

При проведении исследований использован гранулированный доменный шлак Череповецкого металлургического завода по ГОСТ 3476 «Шлаки доменный и электротермофосфорный гранулированные для производства цементов» с химическим составом, представленным в таблице 1.

Жидкое стекло (производитель ООО «Тиккурила СПб») с плотностью 1,3 г/см³ и силикатным модулем $n=1,5$. Гидроксид натрия соответствовал ГОСТ 4328-77. Тонкоизмельченная резиновая крошка с размером частиц менее 0,315 мм из отработавших автошин соответствовала ТУ 2519-001-09691885-2016 «Крошка резиновая».

Для определения ударной прочности были изготовлены образцы-цилиндры с диаметром 2,5 см и высотой 2,5 см. Образцы изготавливали из теста нормальной густоты в соответствии с требованиями ГОСТ 310.3-76. Ударная прочность определялась с использованием копра для испытания цилиндрических образцов на удар. Для определения прочностных

характеристик образцы-призмы с размером 40×40×160 мм были изготовлены из раствора с соотношением вяжущего к песку, равным 1:3. Мелкий заполнитель имел модуль крупности 1,9.

Для определения звукопоглощения авторами был разработан стенд. Стенд представляет звуконепропускаемую коробку, внутри которой располагается прибор для измерения интенсивности звука (шумомер «Testo 816»), а в одной из стенок находится специальное окно, которое перекрывается испытываемым образцом. Через этот образец проходит звук от источника с постоянной громкостью и частотой. Источник звука располагался на постоянном расстоянии от образца. Схема стенда представлена на рисунке 1.

Специальный стенд изготовлен из пенопласта с толщиной листов 100 мм и представляет звукоизолирующую коробку в сборе. Элементы коробки были соединены и загерметизированы при помощи клея OLIVASTRONG «Акрилит-47». Коробка стояла для набора прочности 2 недели. Так как ключевым параметром этого эксперимента является звук (шум), то для чистоты эксперимента внутрь звукоизолирующей коробки помещался прибор – шумомер, фотография которого представлена на рисунке 2.

Шумомер непосредственно измерял интенсивность звука, прошедшего через образец, расположенный в специальном окне. После каждого замера показания шумомера заносились в таблицу, после чего измерения повторялись, по 10 замеров на каждый образец.

В ходе проведения эксперимента были получены три серии результатов, каждая из которых относилась к образцу с определённым составом:

– первая серия результатов относилась к контрольному образцу, в состав которого не вводилась резиновая крошка (образец № 1);

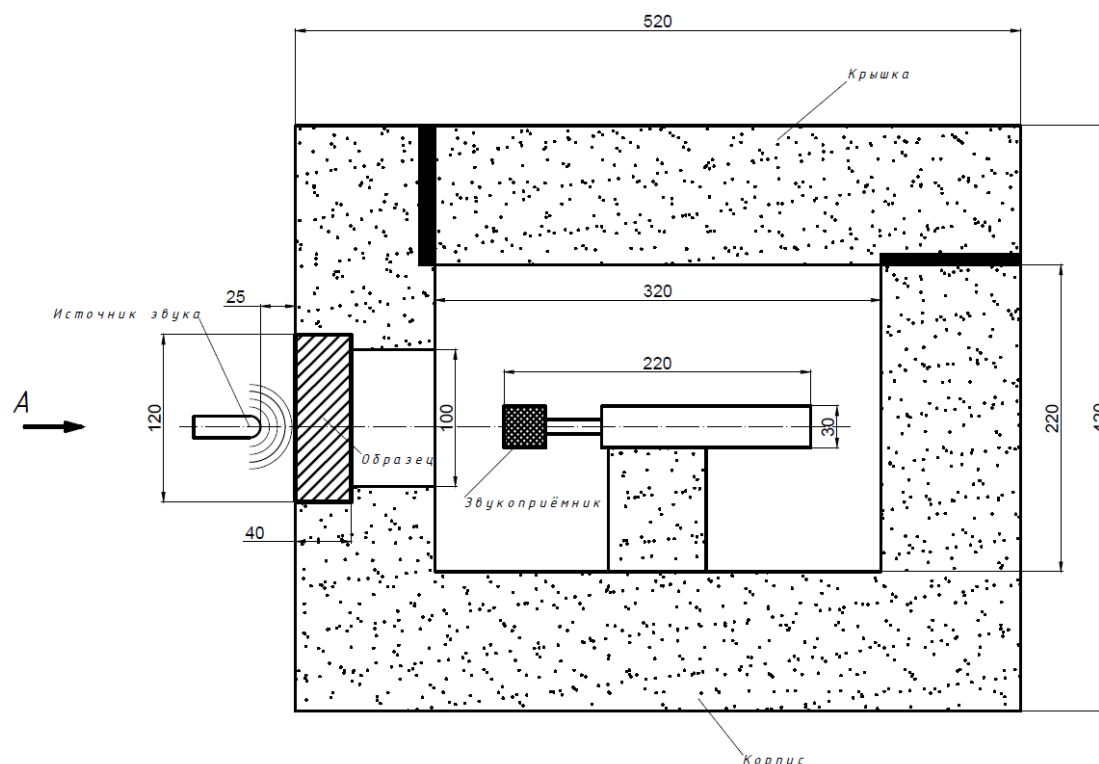


Рис. 1. Схема стенда для испытания образцов на звукопоглощение

– вторая серия результатов относилась к образцу с небольшим содержанием резиновой крошки, частично замещающей мелкий заполнитель (песок) (образец №2);

– третья серия результатов относилась к образцу с наибольшим содержанием резиновой крошки, полностью замещающей мелкий заполнитель (песок) (образец №3).

Резиновая крошка с размером частиц менее 0,315 мм может быть использована в составе композита для повышения ударной прочности согласно результатам таблицы 2. Кроме фракционированной резиновой крошки микро- и нанопористость цементирующей матрицы можно регулировать за счет применения минеральных добавок с развитой системой микро- и нанопор. Такими добавками могут служить термообработанная шелуха риса, молотые обожженные шунгитовые породы, молотый керамический кирпич, гранулированное пеностекло фракции от 100 до 800 мкм и др. Эти добавки выполняют роль демпфирующих компонентов в цементном композите за счет наличия сферических микро- и нанопор, которые способствуют распределению напряже-

ний в матрице и, соответственно, повышению ударной прочности материала [3].

Одной из технологий, где может найти применение разработанный композит, является производство блоков ограждений для авто-

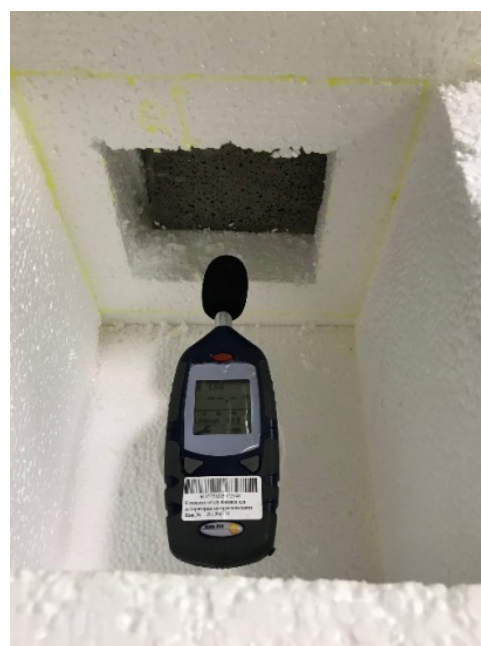


Рис. 2. Испытательный стенд, вид изнутри

Таблица 2

Составы вяжущих и свойства камня

Состав	Компоненты	Состав масс. %	Нормальная густота, %	Средняя плотность, г/см ³	Ударная прочность, кг/см ²
1	Гранулированный доменный шлак Жидкое стекло Гидроксид натрия	86,30 9,40 4,30	25,1	2,214	5,64
2	Гранулированный доменный шлак Термообработанная шелуха риса Резиновая крошка Жидкое стекло Гидроксид натрия	78,50 4,50 4,30 8,90 3,80	25,9	1,756	7,21

Таблица 3

Свойства бетона на основе бесклнкерных вяжущих

№ состава	Сроки схватывания		В/В	Прочность в 28-суточном возрасте, МПа		Удельная работа разрушения, Дж/м ³
	начало, час	конец, час		изгиб	сжатие	
1	0-20	1-00	0,45	5,2	38,2	0
2	0-50	2-10	0,45	4,4	31,1	11065

дорог, поскольку для таких конструкций требуется повышенная ударная прочность и звукопоглощение.

Следующие исследования были проведены для получения данных об изменении деформационных свойств бетонов. Были по-

лучены диаграммы деформирования в осях «нагрузка-прогиб» (рис. 3). Работа разрушения подсчитывалась как площадь фигуры под кривой «нагрузка-прогиб».

Способность образцов к звукопоглощению определялась по снижению уровня шума.

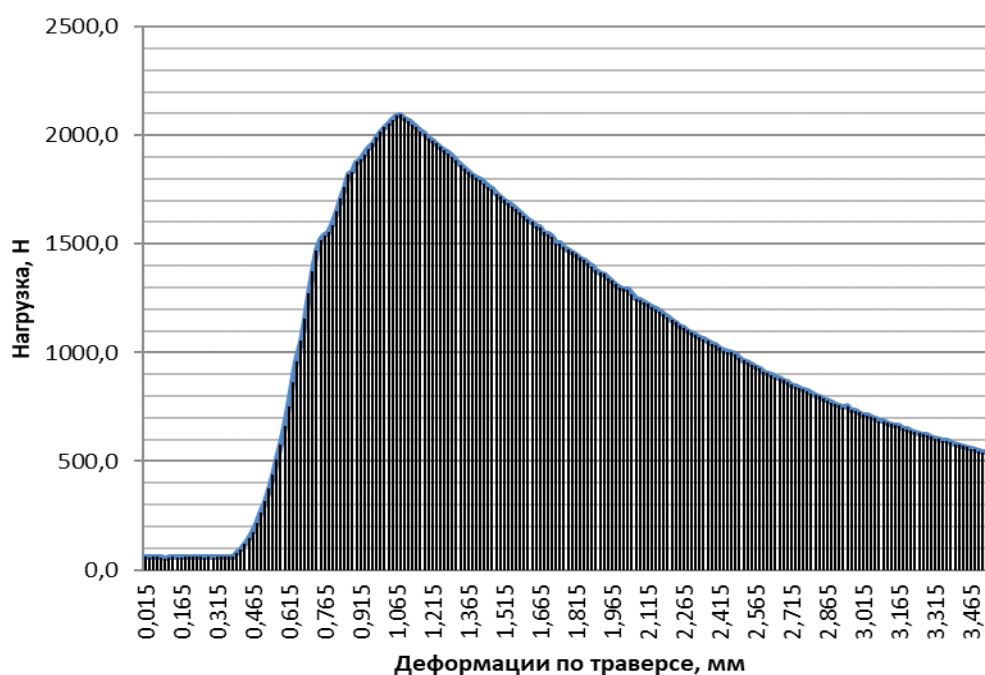


Рис. 3. Кривая деформирования образца состава № 2 с резиновой крошкой

Таблица 4

Результаты лабораторных измерений показателей шумомера

Испытания	Образец			В чистой среде
	№ 1	№ 2	№ 3	
	дБ			дБ
1	78,5	63,4	62,6	84,2
2	76,2	63,6	62,4	
3	67,8	65,3	62,9	
4	68,3	66,1	60,8	
5	68,5	66,4	61,5	
6	67,8	62,2	63,0	
7	70,0	62,4	60,9	
8	66,3	63,4	58,2	
9	69,3	64,0	57,3	
10	68,7	62,9	60,7	
Среднее арифметическое значение	70,4	63,9	61,0	84,2

Результаты исследования представлены в таблице 4.

Разброс значений по снижению уровня шума в серии испытаний одного образца вызван неоднородностями в структуре материала. При анализе усредненных значений можно наблюдать снижение уровня шума с увеличением расхода крошки.

Таким образом, в работе определены прочностные и деформационные свойства при сжатии и растяжении при изгибе для шлакощелочных композитов с резиновой крошкой из изношенных автошин в сравнении с составом без крошки. Использование фракционирован-

ной резиновой крошки позволяет изменять пористость композита и за счет этого повышать звукопоглощающие свойства, ударную прочность. Установлено, что прочность на сжатие снизилась на 19%, прочность на растяжение при изгибе снизилась на 15% в образцах с крошкой, при этом увеличивается удельная работа разрушения, ударная прочность, звукопоглощение. Таким образом, композиты гидратационного твердения с резиновой крошкой можно рассматривать для изготовления строительных конструкций и изделий дорожного строительства, для которых требуется повышенная деформационная способность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bazhenov Y.* The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives / *Y. Bazhenov, I. Kozlova, K. Nechaev [and etc.]* // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 91. С. 02044.
2. *Kazanskaya L.F.* Supersulfated cement applied to produce lightweight concrete / *Kazanskaya L.F., Smirnova O.M., Palomo Á.И. [and etc.]* // Materials. 2021. Т. 14. № 2. С. 1-14.
3. *Kharitonov A., Korobkova M., Smirnova O.* The influence of low-hard dispersed additives on impact strength of concrete // Procedia Engineering. 2015. Т. 108. С. 239-244.
4. *Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z.* Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Т. 509. С. 31-41.

5. *Shcherban E. M.* Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient / *E. M. Shcherban, S. A. Stelmakh, A. Beskopylny [and etc.]*. // *Materials*. 2021. Т. 14. №23. С. 7347.
6. *Stelmakh S. A.* Development of High-Tech Self-Compacting Concrete Mixtures Based on Nano-Modifiers of Various Types / *Stelmakh S. A., Shcherban E. M., Beskopylnyi A. N. [and etc.]*. *Materials*. 2022. Т. 15. № 8. С. 2739.
7. *Амелин С. В.* Переводные брусья из преднапряженного шлакощелочного бетона / *С. В. Амелин, П. Г. Комохов, Т. М. Петрова, В. М. Ермаков* // *Путь и путевое хозяйство*. 1991. № 5. С. 12-14.
8. *Ахметов Д. А.* Влияние мелкодисперсных наполнителей из техногенных отходов и низко-модульного фиброволокна на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов / *Ахметов Д. А., Пухаренко Ю. В., Роот Е. Н., Ахажанов С. Б.* // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 5 (88). С. 102-108.
9. *Зайцева Л. Р.* Влияние вида заполнителя из отходов производств на коррозионную стойкость бетона / *Л. Р. Зайцева, Е. В. Луцук, Т. В. Латыпова, В. М. Латыпов и др.* // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 23-29.
10. *Иващенко Ю. Г.* Структурообразование строительных композиционных материалов на основе местного сырья модифицированных добавками полифункционального назначения / *Ю. Г. Иващенко, Р. Т. Мамешов, Р. Н. Эминов, Ш. М. Магомедов* // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2019. № 6 (39). С. 306-311.
11. *Казанская Л. Ф., Смирнова О. М.* Вяжущие щелочной активации: стремление к альтернативе портландцементу // *Цемент и его применение*. 2015. № 2. С. 137-140.
12. *Королев Е. В.* Перспективы развития строительного материаловедения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 3. С. 143-159.
13. *Харченко А. И.* Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов / *А. И. Харченко, В. А. Алексеев, И. Я. Харченко, А. А. Алексеев* // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 6 (129). С. 680-689.
14. *Лесовик В. С.* Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов / *Лесовик В. С., Федюк Р. С., Гридчин А. М., Мурали. Г.* // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 32-40.
15. *Федюк Р. С.* Повышение ударной вязкости фиброзолобетона / *Р. С. Федюк, Ю. Л. Лисейцев, А. В. Таскин и др.* // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 6. С. 5-16.
16. Пат. 2556563 Российская Федерация, МПК В02С 19/16 (2006.01), В02С 17/00 (2006.01). Вяжущее / *Т. М. Петрова, О. М. Смирнова*; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Государственный университет путей сообщения Императора Александра. № 2014129156/03; заявл. 15.07.2014; опублик. 21.12.2015. 6 с.
17. *Петрова Т. М.* Взаимосвязь структуры и долговечности шлакощелочных бетонов на основе доменных и сталеплавильных шлаков // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 4 (33). С. 167-173.
18. *Рахимова Н. Р., Рахимов Р. З.* Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 2 (56). С. 50-59.
19. *Рахимова Н. Р.* Активированные щелочами цементы с добавкой мергеля / *Н. Р. Рахимова, Р. З. Рахимов, А. Р. Бикмухаметов, Л. И. Потапова* // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 4 (724). С. 5-19.
20. *Федюк Р. С.* Свойства композиционных вяжущих на основе техногенных отходов Дальнего Востока // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 2 (55). С. 132-136.

ALRFLI-ACTIVATED SLAG CONCRETE WITH RUBBER CRAMB FROM TIRES FOR TRANSPORT CONSTRACTION

© O. M. Smirnova¹, L. F. Kazanskaya²

¹*Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,*

²*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia,*

New hydration hardening composites and technology for recycling secondary resources using fractionated rubber chips from worn tires with a fixed fraction have been developed. The requirements for products and structures used in road construction are analyzed. The use of fractionated rubber chips makes possible to change the porosity of the composite and thereby increase the sound-absorbing properties, impact strength. It is stated that by changing the type and consumption of the binder, as well as the consumption of rubber crumbs, it is possible to change the properties of the composite in a wide range: compressive and tensile strength, impact strength, sound absorption coefficient. In addition to fractionated rubber crumbs, the micro- and nanoporosity of the cementing matrix can be regulated by the use of mineral additives with a developed system of micro- and nanopores. The presented results contribute to the development of an ecological approach to making design decisions in construction.

Keywords: alkali-activated slag binder, ground granulated blast furnace slag, sound absorption, impact strength, sustainable development.

REFERENCES

1. Bazhenov, Y., Kozlova, I., Nechaev, K. and Kryuchkova, A. (2019) 'The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives' [*E3S Web of Conferences*]. №91, p. 02044.
2. Kazanskaya, L. F., Smirnova O.M. and Palomo Á. [and etc.] (2021). 'Supersulfated cement applied to produce lightweight concrete'. *Materials*. Vol. 14. №2. Pp. 1-14.
3. Kharitonov, A., Korobkova, M. and Smirnova, O. (2015). The influence of low-hard dispersed additives on impact strength of concrete. *Procedia Engineering*. Vol. 108, pp. 239-244.
4. Rakhimova, N. R. and Rakhimov, R. Z. (2019) 'Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials'. *Journal of Non-Crystalline Solids*. Vol. 509, pp. 31-41.
5. Shcherban, E. M., Stel'makh, S. A. and Beskopylny, A. N. [and etc.] (2021) 'Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient'. *Materials*. Vol. 14, №23 pp. 7347.
6. Stelmakh, S. A., Shcherban, E. M. and Beskopylny, A. N. [and etc.] (2022) 'Development of High-Tech Self-Compacting Concrete Mixtures Based on Nano-Modifiers of Various Types'. *Materials*. Vol. 15. №8. C. 2739.
7. Amelin, S. V., Komohov, P. G., Petrova, T. M. and Ermakov, V. M. (1991) 'Perevodnye brusja iz prednaprjazhennogo shlakoschelochnoogo betona'. *Put'i putevoe hozjajstvo* [Transfer bars made of prestressed slag-alkaline concrete. Path and track facilities]. №5, pp. 12-14.
8. Ahmetov, D. A., Puharenko, Ju. V., Root, E. N. and Ahazhanov, S. B. (2021) 'Vlijanie melkodispersnyh napolnitelej iz tehnogennyh othodov i nizkomodul'nogo fibrovolojna na udoboukladyvaemost' samouplotnjajuschisja betonov'. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [The effect of fine fillers from man-made waste and low-modulus fiber fiber on the workability of self-compacting concrete. Bulletin of Civil Engineers]. №5 (88), pp. 102-108.
9. Zajtseva, L. R., Lutsyk, E. V., Latypova, T. V. [i dr.] (2021) 'Vlijanie vida zapolnitelja iz othodov proizvodstv na korrozionnuju stojkost' betona'. *Stroitel'nye materialy*. [The influence of the type of filler from industrial waste on the corrosion resistance of concrete. Building materials]. №11, pp. 23-29.

10. Ivaschenko, Ju. G., Mameshov, R. T., Eminov, R. N. and Magomedov, Sh. M. (2019) 'Strukturoobrazovanie stroitel'nyh kompozitsionnyh materialov na osnove mestnogo syr'ja modifitsirovannyh dobavkami polifunktsional'nogo naznacheniya'. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Structuring of building composite materials based on local raw materials modified with additives of multifunctional purpose. Technical regulation in transport construction]. №6 (39), pp. 306-311.
11. Kazanskaja, L. F. and Smirnova, O. M. (2015). 'Vjazhuschie schelochnoj aktivatsii: stremlenie k al'ternative portlandtsementu'. *Tsement i ego primenenie* [Alkaline activation binders: striving for an alternative to Portland cement. Cement and its application]. №2, pp. 137-140.
12. Korolev, E. V. (2020) 'Perspektivy razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya'. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. [Prospects for the development of construction materials science. Academia. Architecture and construction]. №3, pp. 143-159.
13. Harchenko, A. I., Alekseev, V. A., Harchenko, I. Ja. and Alekseev, A. A. (2019). 'Primenenie shlakoschelochnyh vjazhuschih v tehnologii strujnoj tsementatsii dlja usilenija gruntov'. *Vestnik MGSU*. [The use of slag – alkaline binders in jet cementation technology to strengthen soils. Bulletin of MGSU]. Vol. 14. №6 (129), pp. 680-689.
14. Lesovik, V.S. Fedjuk, R. S., Gridchin, A. M. and Murali, G. (2021). 'Povyshenie 'ekspluatatsionnyh harakteristik zaschitnyh kompozitov'. *Stroitel'nye materialy*. [Improving the performance of protective composites. Building materials]. №9, pp. 32-40.
15. Fedjuk, R. S., Lisejtsev, Ju. L., Taskin, A. V. [i dr.] (2020) 'Povyshenie udarnoj vjazkosti fibrozolobetona'. *Stroitel'nye materialy i izdelija*. [Increasing the impact strength of fibroconcrete. Building materials and products]. Vol. 3. №6, pp. 5-16.
16. Petrova, T. M. and Smirnova, O. M. Zajavitel' i patentoobladatel' Federal'noe Gosudarstvennoe Bjudzhetnoe Obrazovatel'noe Uchrezhdenie Vysshego Professional'nogo Obrazovaniya Gosudarstvennyj Universitet Putej Soobschenija Imperatora Aleksandra (2006.01). *Vjazhuschee* [Binder], Rossijskaja Federatsija, MPK B02C 19/16 (2006.01), B02C 17/00., application 15.07.2014, No. 2014129156/03, Pat. 2556563, publ. 21.12.2015., 6 p.
17. Petrova, T. M. (2012) 'Vzaimosvjaz' struktury i dolgovechnosti shlakoschelochnyh betonov na osnove domennyh i staleplavil'nyh shlakov'. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. [The relationship between the structure and durability of slag-alkaline concretes based on blast furnace and steelmaking slags. Bulletin of Civil Engineers]. №4 (33), pp. 167-173.
18. Rahimova, N. R. and Rahimov, R. Z. (2021) 'Vlijanie sodержaniya dobavok termoaktivirovannoj gliny na svoystva i sostav produktov tverdeniya kompozitsionnogo shlakoschelochnogo vjazhuschego s nizkim sodержaniem schelochnogo aktivatora'. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. [The effect of the content of additives of thermally activated clay on the properties and composition of the hardening products of a composite slag-alkaline binder with a low content of alkaline activator. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. №2 (56), pp. 50-59.
19. Rahimova, N. R., Rahimov R. Z., Bikmuhametov A. R. and Potapova L. I. (2019) 'Aktivirovannye schelochami tsementy s dobavkoj mergelja'. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. [Alkali-activated cements with the addition of marl. News of higher educational institutions. Construction]. №4 (724), pp. 5-19.
20. Fedjuk, R. S. (2016) 'Svoystva kompozitsionnyh vjazhuschih na osnove tehnogennyh othodov Dal'nego Vostoka'. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. [Properties of composite binders based on technogenic wastes of the Far East. Bulletin of Civil Engineers.]. №2 (55), pp. 132-136.