

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. СОКОЛОВА^{1*}

¹ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», ул. Свободы, д.2 В, г. Самара, 443066, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рассмотрены возможности повышения физико-механических характеристик бетонов специального назначения: жаростойких бетонов для ремонта футеровки керамзитообжигательных печей и гипсобетонов для изготовления стеновых панелей.

Цель. Исследование процессов структурной модификации специальных бетонов (жаростойких и гипсобетонов) с помощью извести в качестве добавки, вводимой для повышения их прочности и долговечности.

Материалы и методы. При подборе составов жаростойких бетонов использовались следующие материалы: глиноземистый цемент; песок, полученный дроблением керамического кирпича; гашеная известь – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; ортофосфорная кислота с концентрацией 30 %. Образцы подвергались обжигу при температуре 800°C и испытывались на прочность с помощью гидравлического пресса. При подборе составов гипсобетона использовались следующие материалы: высокопрочный гипс; известь негашеная молотая – CaO . Проводились электронно-микроскопический и дифференциально-термический анализы. Образцы испытывались на прочность с помощью гидравлического пресса.

Результаты. Испытания образцов жаростойких бетонов, приготовленных на глиноземистом цементе с добавкой гашеной извести – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве 10 % и подвергнутых пропитке ортофосфорной кислотой 30 %-ной концентрации показали предел прочности при сжатии 45 МПа.

В результате исследований образцов из гипсобетона было выявлено, что при включении в его состав 10 % негашеной молотой извести – CaO предел прочности при сжатии составил 373 кгс/см².

Выводы. Жаростойкие бетоны на глиноземистом цементе с добавкой гашеной извести – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве 10 %, пропитанные ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 % обладают высокими физико-термическими показателями, удовлетворительными для работы бетона при температуре 800°C. Добавка в гипсобетон молотой негашеной извести в количестве 10 % от веса гипса повышает прочность материала ($R_{\text{сж}} = 373 \text{ кгс/см}^2$), что позволяет использовать его в производстве гипсобетонных панелей для стен промышленных и гражданских зданий.

Ключевые слова: огнеупоры, модификация, термостойкость, отходы промышленного производства, жаростойкие бетоны, высокопрочный гипс, известь

Для цитирования: Соколова С.В. Изучение физико-механических показателей модифицированных бетонов специального назначения // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 87–96. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-87-96](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-87-96) EDN: SVCLJU

Вклад автора

Соколова С.В. – разработка идеи, подготовка, проведение, обработка и анализ экспериментальных исследований; подбор, анализ и перевод иностранных источников, подбор графических материалов, подготовка рукописи статьи и ее окончательная редакция, систематизация материалов, оформление текста статьи, подбор, анализ и систематизация литературных источников.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.12.2025

Поступила после рецензирования 23.01.2026

Принята к публикации 30.04.2026

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SPECIAL-PURPOSE MODIFIED CONCRETES

S.V. SOKOLOVA^{1*}

¹Volga State University of Railway Transport, Svobody str., 2V, Samara, 443066, Russian Federation

Abstract

Introduction. The possibilities of increasing the physical and mechanical characteristics of special-purpose concretes are considered: heat-resistant concretes for repairing the lining of expanded clay kilns and concretes for making wall panels.

The aim is to study the processes of structural modification of special concretes (heat-resistant and gypsum concretes) using lime as an additive to increase their strength and durability.

Materials and methods. When selecting the compositions of heat-resistant concretes, the following materials were used: aluminous cement; sand obtained by crushing ceramic bricks; slaked lime – Ca(OH)_2 ; orthophosphoric acid with a concentration of 30 %. The samples were fired at a temperature of 800°C and tested for strength using a hydraulic press. When selecting the compositions of gypsum concrete, the following materials were used: high-strength gypsum; unslaked ground lime – CaO . Electron microscopic and differential thermal analyses were performed. The samples were tested for strength using a hydraulic press.

Results. Tests of heat-resistant concrete samples prepared on alumina cement with the addition of slaked lime – Ca(OH)_2 in an amount of 10 % and impregnated with orthophosphoric acid of 30 % concentration showed a compressive strength of 45 MPa.

As a result of studies of samples made of gypsum concrete, it was found that when 10 % of quicklime powder was added, the compressive strength was 373 kgf/cm².

Conclusions. Heat-resistant concretes on aluminous cement with an additive of lime-powder in the amount of 10 %, impregnated with orthophosphoric acid with a concentration of 30 %, have high physical and thermal characteristics, satisfactory for the operation of concrete at temperatures of 800°C. Adding ground quicklime to gypsum concrete at a rate of 10 % of the gypsum weight increases the material's strength [$R_{cr} = 373 \text{ kgf/cm}^2$], making it suitable for use in the production of gypsum concrete panels for industrial and civil buildings.

Keywords: refractories, modification, heat resistance, industrial waste, heat-resistant concretes, high-strength gypsum, lime

For citation: Sokolova S.V. Study of physical and mechanical properties of special-purpose modified concretes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 87–96. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-87-96](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-87-96) EDN: SVCLJU

Author contribution statement:

Sokolova S.V. – development of the idea, preparation, conduct, processing and analysis of experimental studies; selection, analysis and translation of foreign sources, selection of graphic materials, preparation of the manuscript of the article and its final editing, systematization of materials, design of the text of the article, selection, analysis and systematization of literary sources.

Funding

The study had no sponsorship.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 15.12.2025

Revised 23.01.2026

Accepted 30.04.2026

Введение

Приоритетным направлением технологического процесса современного строительства является использование эффективных строительных материалов, снижение материалоемкости, повышение механизации и индустриализации строительства [1–6]. Повышение эксплуатационных характеристик изделий, внедрение безотходных технологий в производство, использование отходов промышленных производств, создающих благоприятные условия для сохранения от загрязнений окружающей среды, являются актуальными проблемами в строительном комплексе [7–17]. Бетон, как универсальный строительный материал, применяется практически во всех областях специального производства [18–20]. Одним из наиболее доступных материалов является известь (известь негашёная комовая CaO , гашеная известь $Ca(OH)_2$), которую в качестве добавки можно применять в жаростойких бетонах как активатор химических процессов, и в гипсобетоне с целью увеличения прочности материала и защиты арматуры от коррозионных процессов [1].

Исследование процессов структурной модификации жаростойких бетонов и гипсобетона, полученных с использованием в качестве добавки гашеной извести $Ca(OH)_2$ (в жаростойких бетонах с последующей пропиткой H_3PO_4 30 %-ной концентрации) и негашеной молотой извести – CaO (в гипсобетонах) проводилось с целью повышения их прочности и увеличения долговечности.

Материалы и методы*Модификация жаростойких бетонов*

С целью изучения процесса структурной модификации жаростойких бетонов растворами фосфатов были применены бетоны на глиноземистом цементе и изучалось влияние пропитки ортофосфорной кислотой жаростойких бетонов на их физико-механические и термические свойства [1]. Опыты производили на образцах с размерами $50 \times 50 \times 50$ мм, пропитку которых производили в естественных условиях ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 %. После пропитки образцы подвергали нагреванию при температуре 800°C с выдержкой в течение двух часов. После каждого нагрева измеряли и фиксировали плотность и прочность образцов при сжатии. Составы жаростойких бетонов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы жаростойких композитов

Table 1

Composition of heat-resistant composites

№ составов	Материалы	Масса, кг/м³	Класс бетона
I	Глиноземистый цемент	660	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
II	Глиноземистый цемент	600	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
	Гашеная известь – $Ca(OH)_2$ (5 %)	60	
III	Глиноземистый цемент	626	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
	Гашеная известь – $Ca(OH)_2$ (10 %)	34	

Модификация гипсобетона

Особое внимание уделяется развитию производства местных строительных материалов, среди которых гипсовые вяжущие занимают одно из первых мест.

Объективным условием для дальнейшего развития гипсовой промышленности являются многочисленные богатые месторождения гипсового камня, позволяющие почти повсеместно развивать производство и использование гипса во многих отраслях народного хозяйства и в первую очередь в строительстве [1].

Для изучения зависимости прочности гипсобетона на высокопрочном гипсе от добавки в качестве негашеной молотой извести изготавливались кубики с ребром 7 см чистого высокопрочного гипса и высокопрочного гипса с добавкой 5 и 10 % извести негашеной молотой – CaO .

Проводился электронно-микроскопический анализ. Препараты для просмотра готовились методом одноступенчатых самостоятельных угольно-платиновых реплик. Напыление производилось на поверхность свежего излома. Реплики просматривались при увеличении около 6000х. Просмотр большого количества участков позволил выявить некоторые закономерности в различии структуры гипсовой отливки в зависимости от добавки негашеной молотой извести и условий хранения образцов.

На рис. 1 приведена электронно-микрофотография образца из отливки высокопрочного гипса с добавкой 5 вес. % извести негашеной молотой.

В электронном микроскопе можно видеть картину преобладания мелких пластинчатых кристаллов двуводного гипса, а на отдельных участках – крупные кристаллы с нечеткими, расплывчатыми гранями (рис. 2).

Возможно это незаконченная кристаллизация двуводного гипса вокруг ядра кристаллизации.

На рис. 3 и рис. 4 приведены электронно-микрофотографии проб гипсовых отливок с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой.

На рис. 3 отчетливо видны крупные пластинчатого строения кристаллы двуводного гипса в достаточно плотной упаковке. На рис. 4 видны крупные кристаллы двуводного гипса многогранной формы.

Проводился дифференциально-термический анализ отливок с добавкой извести негашеной молотой, позволяющий получить кривые дифференциального анализа (ΔT). Скорость нагревания составляла 70° в минуту.



Рис. 1. Электронно-микрофотография образца из отливки высокопрочного гипса добавкой 5 вес. % извести негашеной молотой

Fig. 1. Electron micrograph of a sample from a high-strength gypsum casting with an additive of 5 wt. % of unslaked ground lime



Рис. 2. Электронно-микрофотография участка крупного кристалла из пробы, взятой из отливки из высокопрочного гипса с 5 вес. % извести негашеной молотой

Fig. 2. Electron micrograph of a large crystal from a sample taken from a cast of high-strength gypsum with 5 wt. % of unslaked ground lime



Рис. 3. Электронно-микрофотография пробы гипсовой отливки из высокопрочного гипса с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой, хранившейся в воздушно-сухих условиях

Fig. 3. Electron micrograph of a sample of a plaster casting made of high-strength plaster with an additive of 10 wt.% of ground quicklime stored in air-dry conditions



Рис. 4. Электронно-микрофотография пробы гипсовой отливки из высокопрочного гипса с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой, хранившейся в течение 3-х месяцев в среде с 80 % влажностью
Fig. 4. Electron micrograph of a sample of a high-strength plaster casting with an additive of 10 wt. % of ground quicklime, stored for 3 months in an environment with 80 % humidity

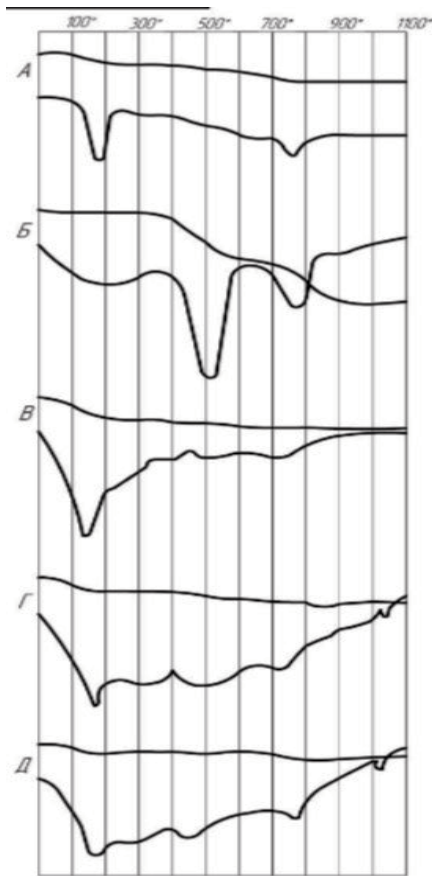


Рис. 5. Кривые ДТА: А – высокопрочный гипс; Б – известь; В – образец из отливки из высокопрочного гипса после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях; Г – образец из отливки из высокопрочного гипса с добавкой 5 % извести после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях; Д – образец из высокопрочного гипса с добавкой 10 % извести после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях
Fig. 5. DTA curves: А – high-strength gypsum; Б – lime; В – sample from a high-strength gypsum casting after 1 month of storage in air-dry conditions; Г – sample from a high-strength gypsum casting with 5 % lime after 1 month of storage in air-dry conditions; Д – sample from a high-strength gypsum casting with 10 % lime after 1 month of storage in air-dry conditions

На рис. 5 приведены результаты анализа проб образцов, хранившихся в воздушно-сухих условиях, а на рис. 6 – проб тех же образцов, но хранившихся в течение 3-х месяцев в среде с относительной влажностью 80 %.

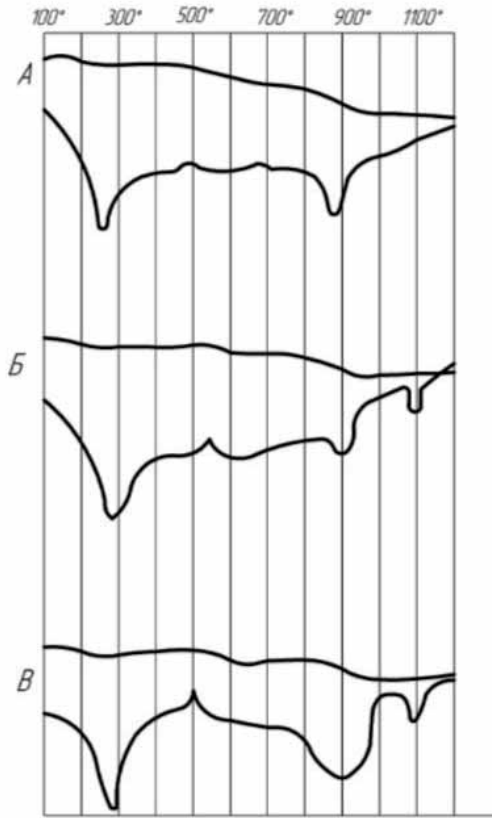


Рис. 6. Кривые ДТА образцов после 3-х месячного их хранения в условиях относительной влажности 80 %:
 А – высокопрочный гипс; Б – высокопрочный гипс + 5 % извести; В – высокопрочный гипс + 10 % извести

Fig. 6. DTA curves of samples after 3 months of storage at a relative humidity of 80 %:
 A – high-strength gypsum; B – high-strength gypsum + 5 % lime; C – high-strength gypsum + 10 % lime

Кривые почти одинаковы с одноименными ДТА, приведенными на рис. 5, только рассмотренные выше эффекты на них более четко выражены.

Результаты и обсуждение

Модификация жаростойких бетонов

Результаты испытаний на предел прочности при сжатии образцов жаростойких бетонов, приготовленных на глиноземистом цементе с добавкой и без добавки извести были следующие: первый состав: 32 МПа; второй состав: 42 МПа; третий состав: 45 МПа.

Таким образом, наибольшей прочностью обладают образцы на глиноземистом цементе, пропитанные ортофосфорной кислотой 30 %-ной концентрации, в составе которых присутствует гашеная известь $Ca(OH)_2$ в количестве 10 %.

Модификация гипсобетона

Как видно из рис. 5, кривая А свидетельствует об удалении гидратной воды и о дегидратации отдельных зерен двуводрата. Второй эндотермический эффект свидетельствует о полном обезвоживании гипса.

Кривая Б имеет два эндотермических эффекта. Первый при 500–550 °С, свидетельствующий о моменте потери гидратной воды, и второй при 800 °С, свидетельствующий о наличии в извести зерен карбоната.

Кривые В, Г и Д – схожи: они получены при термическом анализе гипсовых отливок с добавкой извести негашеной молотой в количестве от 0 до 10 вес. %.

Каждая из кривых характеризуется двумя основными эндотермическими эффектами: при 150 °С и при 800–950 °С.

Первый – это потеря гигроскопической и гидратной воды, а второй – диссоциация карбонатов. Эффект тем ярче, чем больше было количество добавки извести.

На средних частях кривых можно заметить экзотермический эффект при температуре около 450 °С. Возможно это момент превращения отдельных зерен растворимого ангидрита в нерастворимый.

Возможно наличие в отвердевшей отливке и новообразований в результате взаимодействия в процессе схватывания полуводного высокопрочного гипса и извести. Такие новообразования могут возникать на поверхности наиболее крупных кристаллов полуводного высокопрочного гипса.

Таким образом, добавка к гипсу негашеной молотой извести улучшает качество отливки.

Испытания образцов гипсобетона на предел прочности при сжатии дали следующие результаты: высокопрочный гипс без добавок – 353 кг/см²; высокопрочный гипс + 5 % извести негашеной молотой – 345 кг/см²; высокопрочный гипс + 10 % извести негашеной молотой – 373 кг/см².

Наибольшей прочностью обладают образцы высокопрочного гипса с 10 % добавкой извести негашеной молотой – *СаО*.

Выводы

1. С целью изучения процесса структурной модификации жаростойких бетонов растворами фосфатов были применены бетоны на глиноземистом цементе, пропитку которых производили ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 %. Как показали проведенные опыты, наибольшей прочностью и меньшей усадкой после температурной обработки (800°С) обладают бетоны, пропитанные 30 % раствором ортофосфорной кислоты, в состав которых входит гашеная известь – *Са(ОН)₂* (10 %).

2. При проектировании составов гипсобетонов, добавка в гипсовый раствор негашеной молотой извести ускоряет и улучшает раскристаллизацию основной массы раствора, что выражается в более четкой огранке кристаллов, в улучшении структуры в целом за счет карбонизации и уменьшения размеров пор; влажные условия хранения образцов ускоряют кристаллизацию гипса и карбонизацию *Са(ОН)₂*. Таким образом, введение негашеной извести в качестве модифицирующей добавки в гипсобетон повышает прочность и долговечность строительных изделий и конструкций.

Список литературы / References

1. Передерий И.А., Федоров В.П. Исследование коррозии стали в гипсобетоне на высокопрочном гипсе и электрохимическая защита // *Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура*. 1967. № 3. С. 20–25. [Perederij I.A., Fedorov V.P. The study of steel corrosion in gypsum concrete on high-strength gypsum and electrochemical. *News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture*, 1967, no. 3, pp. 20–25. (In Russian)].
2. Alp I. et al. Potential use of pyrite cinders as raw material in cement production: Results of industrial scale trial operation. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, pp. 144–149. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.1293.
3. Abikak E.B., Kenzhaliyev B.K. Development of an integrated technology intended to process pyrite cinders using Chemical pre-activation. *NEWS Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan Ser. Geol. Tech. Sci.* 2022. Vol.3. Pp. 32–51. DOI: 10.32014/2022.2518-170x.178
4. Deryagin V.B. et al. Heat-resistant thermally insulating concretes with phosphate and aluminate binders. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 243–246. DOI: 10.1007/s11148-011-9406-x
5. Makaria K., Santhanam S. Micromechanical modeling of thermo-mechanical properties of high volume fraction particle-reinforced refractory composites using 3D Finite Element analysis. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, pp. 4381–4393. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.10.162
6. Šavija B., Smith G.E., Liu D., Schlangen E., Flewitt P.E.J. Modelling of deformation and fracture for a model quasi-brittle material with controlled porosity: Synthetic versus real microstructure. *Eng. Fract. Mech.*, 2019, vol. 205, pp. 399–417. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.008
7. Andreev K., Verstrynghe E., Wevers M. Compaction and shear failure of refractory mortars – effects of porosity and binder hardening. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2017, vol. 37, pp. 841–848. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.08.040
8. Nguyen T.T., André D., Huger M. Analytical laws for direct calibration of discrete element modelling of brittle elastic media using cohesive beam model. *Comput. Part. Mech.*, 2019, vol. 6, pp. 393–409. DOI: 10.1007/s40571-018-00221-0
9. Moreira M.H., Cunha T.M., Campos M.G.G., Santos M.F., Santos Jr.T., Andre D., Pandolfelli V.C. Discrete element modeling – A promising method for refractory microstructure design. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 2020, vol. 99, no. 2, pp. 22–28.
10. Lohmann J., Kölzer T., Schaan G., Schmidt-Döhl F. Self-organizing systems in the construction industry. *Eng. Rep.*, 2023, vol. 5, no. 11. DOI: 10.1002/eng2.12692
11. Djobo J.N.Y., Stephan D. The reaction of calcium during the formation of metakaolin phosphate geopolymer binder. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 158, pp. 168–172.
12. Luz A.P., Gomes D.T., Pandolfelli V.C. High-alumina phosphate-bonded refractory castables: $\text{Al}(\text{OH})_3$ sources and their effects. *Ceramics International*, 2015, vol. 41(7), pp. 9041–9050. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.03.276
13. Diaz I.G., Palomo J.G., Puertas F. Belite cements obtained from ceramic wastes and the mineral pair $\text{CaF}_2/\text{CaSO}_4$. *Cement Concr. Compos.*, 2011, vol. 33, no. 10, pp. 1063–1070.
14. Nishanth K.S., Naik P.A. Performance of concrete using lime sludge, rice-husk ash and foundry sand. *NMAMIT Annual Research Journal*, 2015, vol. 5, pp. 23–28.
15. Tkach E., Filimonova Y. Modified concrete for irrigation and drainage construction. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001007
16. Yue L., Yan Z., Wei F., Weiwei D., Lei W. Recycling industrial wastes into self-healing concrete: A review. *Environmental Research*, 2022, vol. 214, part 4. p. 113975. DOI:10.1016/j.envres.2022.113975
17. Changzai R., Shuang W., Wenlong W., Lei C., Yonghui B., Tingting Z., Huan L., Yuxiao Z. Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminate-magnesia aluminum spinel cement. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 64, p.105550. DOI:10.1016/j.job.2022.105550
18. Geraldo R.H. Calcination parameters on phosphogypsum waste recycling / R.H. Geraldo, A.R.D. Costa, J. Kanai, et al. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 256, p. 119406. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119406
19. Runfeng L., Yang Z., Cuiwei L., Shibo L., Zhenying H. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 213, pp. 43–50. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040.

20. Chang S., Lulu C., Jianzhuang X., Amardeep S., Jiahao Z. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 170, p.105561. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>

Информация об авторе/Information about the author

Светлана Владимировна Соколова, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство» ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», Самара
e-mail: sokolova9967@mail.ru

Svetlana V. Sokolova*, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the department «Volga State University of Railway Engineering», Samara
e-mail: sokolova9967@mail.ru