

Исследование реологических процессов структурообразования цементных систем с использованием отхода вспученного перлитового песка

Н.А. Аюбов

*Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук, г. Грозный, Россия*

Аннотация: Рассматривается влияние алюмосиликатного компонента на свойства строительных растворов и бетонов. Особое внимание уделено добавлению перлитовой пыли в цементное вяжущее и применению суперпластификатора Полипласт СП-1 для регулирования реологических свойств. Экспериментально установлено, что увеличение содержания перлита повышает водопотребность и снижает текучесть смеси из-за его высокой удельной поверхности и пористой структуры. Изучены реологические свойства различных составов с использованием ротационного вискозиметра. Результаты показывают, что добавление суперпластификатора снижает вязкость и улучшает текучесть, что особенно важно для предотвращения деформаций и внутренних напряжений в твердеющих системах.

Ключевые слова: техногенное сырье, перлит, алюмосиликатный компонент, строительные растворы, бетоны, реологические свойства, суперпластификатор.

Обрабатываемость строительных растворов и бетонов связана с их консистенцией, которая влияет на транспортировку и укладку бетонной смеси. В работе исследовали влияние количества алюмосиликатного компонента на свойства вяжущего. Варьировали количество предварительно домолотого до $S_{уд}=300$ м²/кг перлита в цементном вяжущем. Для регулирования реологических свойств смеси применяли суперпластифицирующую добавку – Полипласт СП-1. Разжижающую способность цементно-песчаных смесей определяли по расплыву конуса в соответствии с ГОСТ 310.481. Экспериментальные исследования проводили примерно через 5 мин после приготовления сырьевой смеси. Эталонный раствор на основе цемента без добавления перлита характеризовался наибольшим диаметром текучести - 116 мм. Результаты экспериментальных данных отражены в таблице 1.

Таблица № 1

Составы вяжущего с перлитовой пылью

№ состава	Количество перлита, %	СП, %	В/Ц	Расплыв конуса (106-115), мм
1	10	-	0,45	115
2	20	-	1,07	110
3	30	-	1,6	108
4	50	-	1,95	106
5	10	1	0,45	116
6	20	1	0,8	114
7	30	1	1,2	108
8	50	1	1,4	110

С увеличением расхода перлита возрастает водопотребность вяжущего, а текучесть смеси снижается, что связано с высокой удельной поверхностью перлита и его пористой структурой. Как известно, добавки суперпластификатора в основном адсорбируются на частицах, обладающих определенным зарядом [1-3]. Адсорбционный характер перлита обусловлен силанольными группами, образующимися на его поверхности атомами кремния. Были проведены измерения дзета-потенциала (оборудование Zetasizer Nano ZS), в результате которых установлено, что заряд поверхности перлита составляет – 46.8 mV.

Добавление суперпластификатора несущественно отразилось на показателях водопотребности и расплыву конуса сырьевой смеси [4]. Это обусловлено слабой адсорбцией молекул модификатора на поверхности, содержащей в основном отрицательно заряженные активные центры, а также пористой структурой частиц с высокой поглощающей способностью.

Для анализа процессов структурообразования при твердении цементных систем немаловажным является изучение реологических свойств смеси [5].

Реология цементных смесей, как и других структурированных материалов, связана с их структурой, изменяющейся в процессе твердения [6-8]. Для оценки особенностей структурообразования при гидратации разработанного композиционного вяжущего были исследованы его реологические свойства в сравнении с обычным портландцементом. Было подготовлено 6 составов:

1. KB80 без пластифицирующей добавки;
2. KB80 с пластифицирующей добавкой;
3. KB50 без пластифицирующей добавки;
4. KB50 с пластифицирующей добавкой
5. ПЦ без добавки;
6. ПЦ с добавкой.

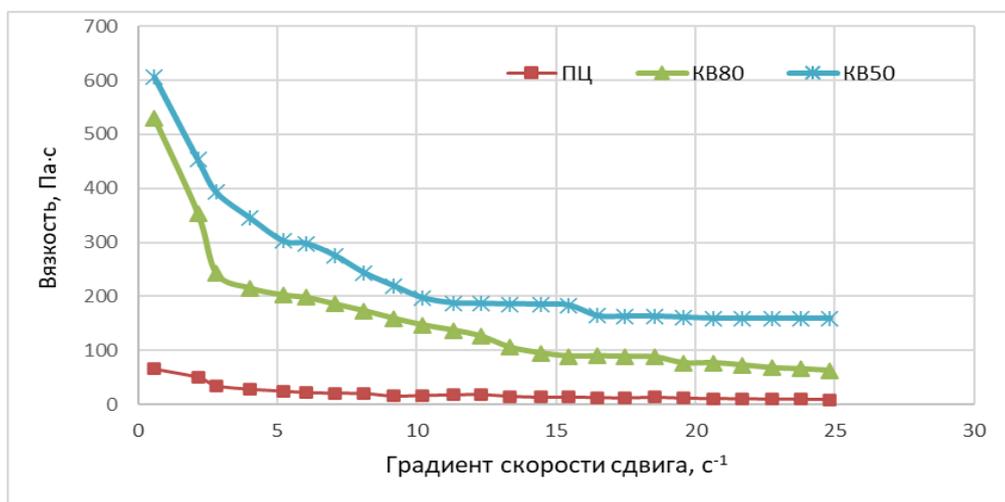
Добавка вводилась в количестве 1%.

За контрольный принят состав вяжущего, содержащий только портландцемент. Реологические свойства сырьевых смесей изучали с помощью ротационного вискозиметра «Реотест - 2,1». При анализе реограмм наблюдаются зависимости характерные для псевдопластичных систем, а именно уменьшение вязкости при увеличении градиента скорости сдвига (рисунок 1).

В композиционных смесях без добавления пластификатора исходная вязкость раствора на портландцементе составляет 65 Па·с, замена 20 % цемента на перлитовую пыль (KB80) приводит к увеличению вязкости до значения $\eta = 529$ Па·с. Соблюдается характерная закономерность с увеличением количества перлита в смеси – увеличивается вязкость, а в случае исследования KB50 – отмечаются максимальные значения $\eta = 605$ Па·с. Эта закономерность связана с высокой удельной поверхностью перлита и его пористой структурой, позволяющей адсорбировать воду на первоначальном этапе и отдавать запасенную в ячейках воду с течением

времени. Данный факт подтверждается, скачками вязкости на графиках KB80, KB50 при возрастании скорости сдвига, что характеризует физические процессы в пористой структуре перлита. Однако этот процесс не желателен, так как приводит к образованию внутренних напряжений, вызывающих деформации, с точки зрения повышения анизотропии свойств твердеющего материала [9-12]. Особенно значение проявление усадочных деформаций имеет для изделий ограниченной толщины, в первую очередь – штукатурок, толщина которых может достигать 60 мм.

а



б

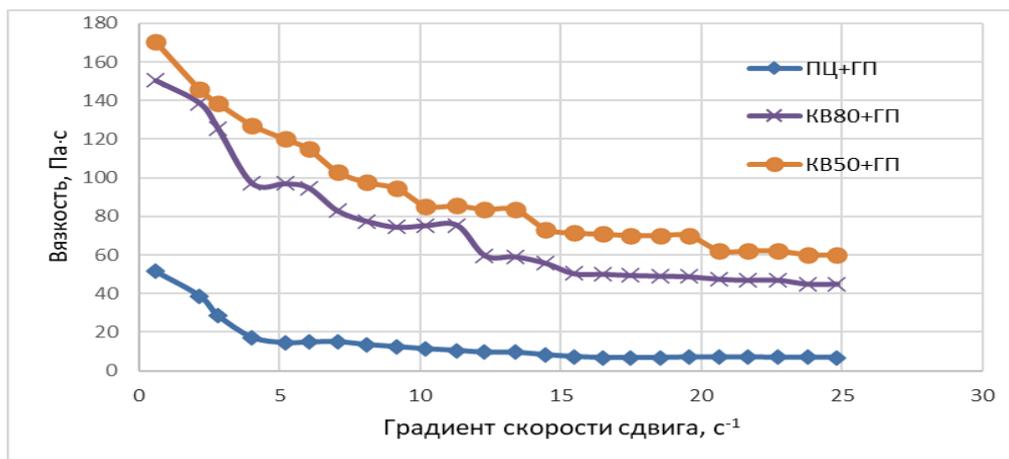
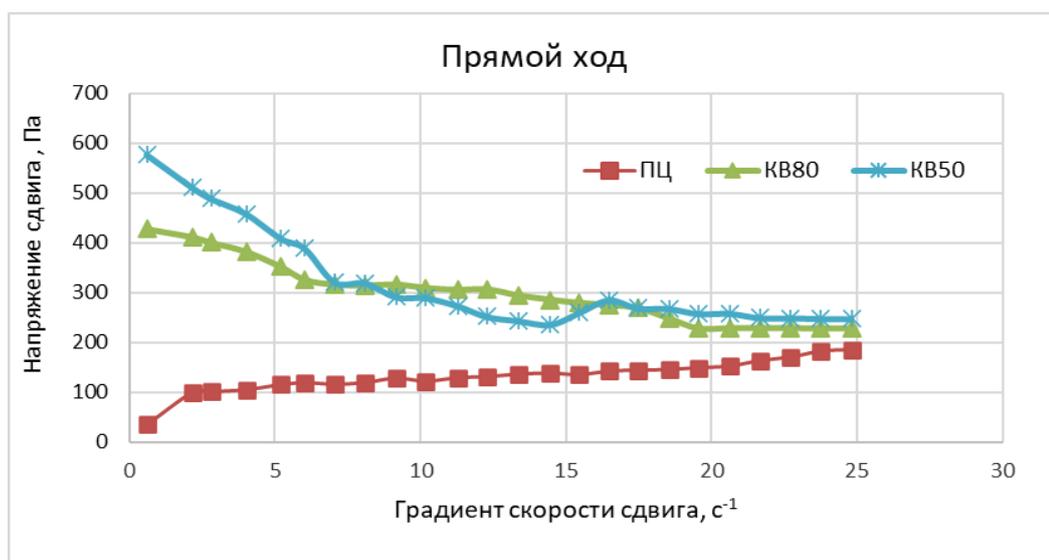


Рис. 1. – Реограмма зависимости вязкости от градиента скорости сдвига: а – без использования пластификатора; б – с пластифицирующей добавкой

Введение суперпластификатора позволяет незначительно снизить исходную вязкость вяжущего на основе портландцемента до $\eta = 51$ Па·с. Отмечается существенное влияние пластифицирующей добавки на сырьевые смеси с перлитом. В этом случае вязкость KB80 снижается до $\eta = 150$ Па·с, KB50 – до $\eta = 170$ Па·с. Графики приобретают более плавный характер за счет повышения эластичности вяжущей системы.

а



б

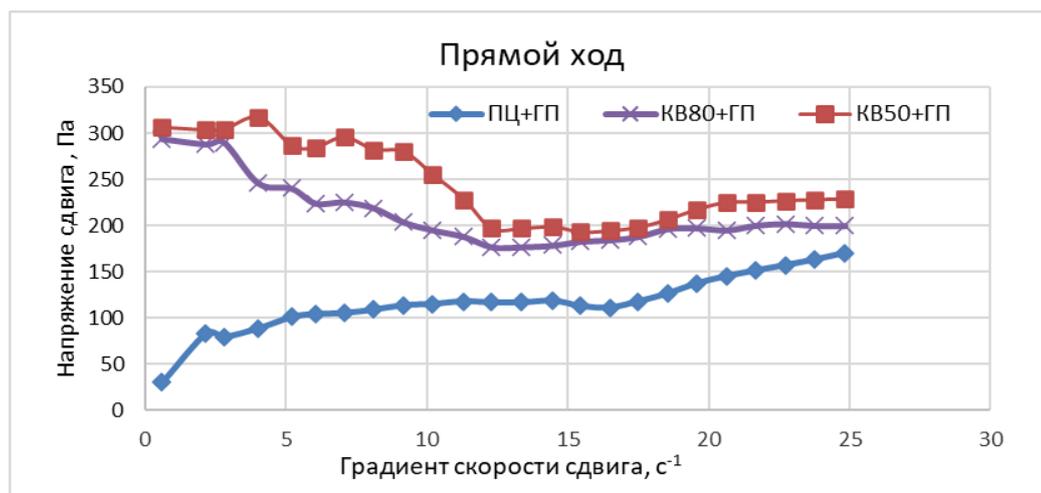


Рис. 2. – Реограмма зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига: а – без использования пластификатора; б – с пластифицирующей добавкой

Согласно рисунку 2 (а) наибольшее снижение напряжения сдвига при изменении градиента скорости сдвига наблюдается при пластической вязкости с меньшим сопротивлением потоку в вяжущем с перлитом.

Контрольный состав отличается противоположными показателями, а именно, с увеличением градиента скорости сдвига напряжение сдвига увеличивается, т.е. увеличивается сопротивление дисперсных частиц вяжущего (рисунок 2 а). Эти закономерности сохраняются и в случае использования пластифицирующей добавки (рисунок 2 б).

Изменение величины предельных напряжений сдвига обусловлено механическим трением между частицами дисперсной фазы и зависит от размера, формы и концентрации твердых веществ в системе, а также вязкости дисперсионной среды. В условиях механических воздействий и, в первую очередь, сдвиговых деформаций происходит формирование и разрушение агрегатов частиц. К параметрам структуры целесообразно отнести концентрацию твердой фазы в системе и энергию межфазных и межчастичных взаимодействий [13-16]. К внешним воздействиям могут быть отнесены параметры напряжения сдвига: величиной нагрузки и градиентом скорости сдвига. Внутри системы вяжущего с перлитом удерживается большее количество воды, что определяется физико-химическими процессами, протекающими в системе «вяжущее–вода», о чем можно судить по скачкам реологических кривых [17]. В процессе гидратации данной системы создается дефицит влаги частиц перлита, которые возвращают раннее иммобилизованную влагу в твердеющую систему, приводя при этом систему к текучему состоянию.

Таким образом, в цементно-водных дисперсиях формируются агрегаты твердых фаз, в которых с ростом напряжений сдвига относительная вязкость повышается. При использовании перлита в системе удерживается большее

количество воды, что определяет физико-химические процессы, протекающие в системе [18-23]. В результате возвращения ранее иммобилизованной влаги в твердеющую систему отмечаются нежелательные скачки вязкости, что может приводить к образованию внутренних напряжений, вызывающих деформации [24,25]. Введение пластифицирующих добавок позволяет минимизировать данный процесс. С ростом напряжений сдвига система переходит к снижению вязкости и текучему состоянию, за счет гомогенного распределения частиц дисперсной фазы [26].

Литература

1. Pilakoutas K., Neocleous K., Tlemat H. Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. Proc. ICE – Eng. Sustain., 157 (3) (2004). Pp. 131 – 138.
2. Neocleous, Kyriacos & Tlemat, Houssam & Pilakoutas, Kypros. Design Issues for Concrete Reinforced with Steel Fibers, Including Fibers Recovered from Used Tires. Journal of materials in civil engineering. 2006. 18. 677.
3. Tlemat Houssam & Pilakoutas, Kypros & Neocleous, Kyriacos. (2006). Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres. Materials and Structures. 39. 365-377. 10.1007/s11527-005-9009-4.
4. Aiello M.A., Leuzzi F., Centonze G., Maffezzoli A. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. Waste Management. Volume 29, Issue 6, 2009. Pages 1960-1970. ISSN 0956-053X. doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002.
5. Гусев А.Д. Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гусев Алексей Дмитриевич. Пенза: ПГУАС, 2012. 20 с.
6. Мещерин В.С. Предупреждение трещинообразования в бетоне с помощью фиброармирования. Бетон и Железобетон 2012. 1. С. 50 – 57.

7. Даньщиков Е.В., Лучник И.Н., Рязанов А.В., Чуйко С.В. Способ переработки резинотехнических изделий. Пат. №2111859 РФ. / заявл. 16.03.1995 опубл. 27.05.1998. 20 с. №96120371/25

8. Никольский В.Г., Красоткина И.А., Дударева Т.В. Способ переработки автопокрышек ирезинотехнических отходов, армированных кордом. Пат. №2325995 РФ. / Бюл. № 16. 13 с. заявл. 21.11.2005 опубл. 10.06.2008. №2006119351/12.

9. Авдюнин К.В. Способ отделения невулканизированной резиновой смеси от металлического корда в браке/отходах обрезиненного металлического корда. Пат. №2746836 РФ. / Бюл. №12. 23 с. заявл. 04.03.2020. опубл. 21.04.2021 №2020109564.

10. Вещев А.А., Соколов А.Е., Панкратовский А.О. Экспериментальное исследование процесса отделения металлокорда от фрагментов утилизируемых шин методом непрерывной прокатки. Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2012. №12. С. 99 – 103.

11. Хозин В.Г. Перспективы развития отрасли строительных материалов в свете использования вторичных ресурсов. Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1(11). С. 22 – 29.

12. Senesavath S., Salem A., Kashkash S., Zehra B. and Orban Z. The effect of recycled tyre steel fibers on the properties of concrete. Pollack. 2022. 17. Pp. 43–49. doi:10.1556/606.2021.00388.

13. Zia, A.; Pu, Z.; Holly, I.; Umar, T.; Tariq, M.A.U.R.; Sufian, M. A Comprehensive Review of Incorporating Steel Fibers of Waste Tires in Cement Composites and Its Applications. Materials. 2022. 15. 7420. doi.org/10.3390/ma15217420.

14. Sadık Alper Yıldızıl, Yasin Onuralp Özkılıç, Alireza Bahrami, Ceyhun Aksoylu, Boğaçhan Başaran, Ahmad Hakamy, Musa Hakan Arslan. Experimental investigation and analytical prediction of flexural behaviour of reinforced concrete

beams with steel fibres extracted from waste tyres. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 19. e02227.

15. Ana Baricevic, Martina Grubor, Rinaldo Paar, Panos Papastergiou Long-term monitoring of a hybrid SFRC slab on grade using recycled tyre steel fibres. *Advances in Concrete Construction*. 2020. 10 (6). Pp. 547–557. doi.org/10.12989/acc.2020.10.6.547.

16. Shizhao Yang, Xujiang Wang, Zhijuan Hu, Jingwei Li, Xingliang Yao, Chao Zhang, Changliang Wu, Jiazheng Zhang, Wenlong Wang Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating recycled waste and byproducts: A review. *Construction and Building Materials*. 2023. 403. 133083. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133083

17. Wang Xiaoxiao, Li Dexi, Bai Ru, Liu Shuguang, Yan Changwang and Zhang Ju. «Evolution of the pore structure of pumice aggregate concrete and the effect on compressive strength». *Reviews on advanced materials science*. 2023. 62 (1). 20230112. doi.org/10.1515/rams-2023-0112.

18. Kumar R. and B. Bhattacharjee. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. 331. Pp. 155–164. doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0.

19. Gao S., Huang K., Chu W., Wang W. Feasibility Study of Pervious Concrete with Ceramsite as Aggregate Considering Mechanical Properties, Permeability, and Durability. *Materials*. 2023. 16. 5127.

20. Aglan H., Morsy M., Allie A., Fouad F. Evaluation of fiber reinforced nanostructured perlite-cementitious surface compounds for building skin applications. *Construction and Building Materials*. 2009. 23(1). Pp. 138–145.

21. Mohammad M. Ul I., Jie Li, Rajeev Roychand, Mohammad Saberian, Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles. *Construction and Building Materials*. 2023. 408. 133658.

22. Klyuev Aleksandr, Kashapov Nail, Klyuev Sergey, Ageeva Marina, Fomina Ekaterina, Sabitov Linar, Nedoseko Igor, Vatin Nikolai Ivanovich, Kozlov Pavel, Vavrenyuk Svetlana Alkali-activated binders based on technogenic fibrous waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 18. e02202.

23. Klyuev Aleksandr, Klyuev Sergey, Fomina Ekaterina, Shorstova Elena, Ageeva Marina, Nedoseko Igor, Sabitov Linar, Shamanov Vitaly, Shayakhmetov Rinat, Liseitsev Yury Wastes from the production of heat-insulating basalt wool as an additive in cement-based materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 19. e02347.

24. Klyuev S., Fediuk R., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Shorstova E., Zolotareva S., Shchekina N., Shapovalova A., Sabitov L. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. e01099.

25. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V., Shamgulov R., Fediuk R., Sabitov L. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. e01071.

26. Kadela Marta, Malek Marcin, Jackowski Mateusz, Kunikowski Mateusz, Klimek Agnieszka, Dudek, Daniel, Rośkowicz Marek. Recycling of Tire-Derived Fiber: The Contribution of Steel Cord on the Properties of Lightweight Concrete Based on Perlite Aggregate. *Materials*. 2023. 16. 2124. 10.3390/ma16052124.

References

1. Pilakoutas K., Neocleous K., Tlemat H. Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. *Proc. ICE – Eng. Sustain.*, 157 (3) (2004). Pp. 131 – 138.
2. Neocleous, Kyriacos & Tlemat, Houssam & Pilakoutas, Kypros. Design Issues for Concrete Reinforced with Steel Fibers, Including Fibers Recovered from Used Tires. *Journal of materials in civil engineering*. 2006. 18. 677.

3. Tlemat Houssam & Pilakoutas, Kypros & Neocleous, Kyriacos. (2006). Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres. *Materials and Structures*. 39. 365-377. 10.1007/s11527-005-9009-4.
 4. Aiello M.A., Leuzzi F., Centonze G., Maffezzoli A. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management*. Volume 29, Issue 6, 2009. Pages 1960-1970. ISSN 0956-053X. doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002.
 5. Gusev A.D. E`ffektivny`e stroitel`ny`e materialy` s ispol`zovaniem texnogenny`x otxodov [Effective construction materials using technogenic waste]: abstract of dissertation ... candidate of technical sciences. Gusev Alexey Dmitrievich. Penza: PGUAS, 2012. 20 p.
 6. Meshcherin V.S. *Beton i Zhelezobeton* 2012. 1. Pp. 50 – 57.
 7. Danshchikov E.V., Luchnik I.N., Ryazanov A.V., Chuiko S.V. Sposob pererabotki rezinotexnicheskix izdelij [Method for processing rubber products]. Patent No. 2111859 RF. / filed 16.03.1995; published 27.05.1998. 20 p. No. 96120371/25.
 8. Nikolsky V.G., Krasotkina I.A., Dudareva T.V. Sposob pererabotki avtopokry`shek irezinotexnicheskix otxodov, armirovanny`x kordom [Method for processing tires and rubber waste reinforced with cord]. Patent No. 2325995 RF. filed 21.11.2005. published 10.06.2008. Bulletin No. 16. 13 p. No. 2006119351/12.
 9. Avdyunin K.V. Sposob otdeleniya nevulkanizirovannoj rezinovoj smesi ot metallicheskogo korda v brake/otxodax obrezinennogo metallicheskogo korda [Method for separating unvulcanized rubber mixture from metal cord in scrap/waste of rubberized metal cord]. Patent No. 2746836 RF. filed 04.03.2020. published 21.04.2021. Bulletin No. 12. 23 p. No. 2020109564.
-

10. Veschev A.A., Sokolov A.E., Pankratovsky A.O. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Ximiya i ximicheskaya texnologiya. 2012. No. 12. Pp. 99 – 103.
 11. Khozin V.G. Polimery` v stroitel`stve: nauchny`j internet-zhurnal. 2023. No. 1(11). Pp. 22 – 29.
 12. Senesavath S., Salem A., Kashkash S., Zehra B. and Orban Z. The effect of recycled tyre steel fibers on the properties of concrete. Pollack. 2022. 17. 43–49. doi:10.1556/606.2021.00388.
 13. Zia, A.; Pu, Z.; Holly, I.; Umar, T.; Tariq, M.A.U.R.; Sufian, M. A Comprehensive Review of Incorporating Steel Fibers of Waste Tires in Cement Composites and Its Applications. Materials. 2022. 15. 7420. doi.org/10.3390/ma15217420.
 14. Sadık Alper Yıldız, Yasin Onuralp Özkılıç, Alireza Bahrami, Ceyhun Aksoylu, Boğaçhan Başaran, Ahmad Hakamy, Musa Hakan Arslan. Experimental investigation and analytical prediction of flexural behaviour of reinforced concrete beams with steel fibres extracted from waste tyres. Case Studies in Construction Materials. 2023. 19. e02227.
 15. Ana Baricevic, Martina Grubor, Rinaldo Paar, Panos Papastergiou Long-term monitoring of a hybrid SFRC slab on grade using recycled tyre steel fibres. Advances in Concrete Construction. 2020. 10 (6). 547–557. DOI: doi.org/10.12989/acc.2020.10.6.547.
 16. Shizhao Yang, Xujiang Wang, Zhijuan Hu, Jingwei Li, Xingliang Yao, Chao Zhang, Changliang Wu, Jiazheng Zhang, Wenlong Wang Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating recycled waste and byproducts: A review. Construction and Building Materials. 2023. 403. 133083. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133083.
 17. Wang Xiaoxiao, Li Dexi, Bai Ru, Liu Shuguang, Yan Changwang and Zhang Ju. «Evolution of the pore structure of pumice aggregate concrete and the
-

effect on compressive strength». *Reviews on advanced materials science*. 2023. 62 (1). 20230112. doi.org/10.1515/rams-2023-0112.

18. Kumar R. and B. Bhattacharjee. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. 331. 155–164. doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0.

19. Gao S., Huang K., Chu W., Wang W. Feasibility Study of Pervious Concrete with Ceramsite as Aggregate Considering Mechanical Properties, Permeability, and Durability. *Materials*. 2023. 16. 5127.

20. Aglan H., Morsy M., Allie A., Fouad F. Evaluation of fiber reinforced nanostructured perlite-cementitious surface compounds for building skin applications. *Construction and Building Materials*. 2009. 23(1). Pp. 138–145.

21. Mohammad M. Ul I., Jie Li, Rajeev Roychand, Mohammad Saberian, Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles. *Construction and Building Materials*. 2023. 408. 133658.

22. Klyuev Aleksandr, Kashapov Nail, Klyuev Sergey, Ageeva Marina, Fomina Ekaterina, Sabitov Linar, Nedoseko Igor, Vatin Nikolai Ivanovich, Kozlov Pavel, Vavrenyuk Svetlana Alkali-activated binders based on technogenic fibrous waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 18. e02202.

23. Klyuev Aleksandr, Klyuev Sergey, Fomina Ekaterina, Shorstova Elena, Ageeva Marina, Nedoseko Igor, Sabitov Linar, Shamanov Vitaly, Shayakhmetov Rinat, Liseitsev Yury Case Studies in Construction Materials. 2023. 19. e02347.

24. Klyuev S., Fediuk R., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Shorstova E., Zolotareva S., Shchekina N., Shapovalova A., Sabitov L. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. e01099.



25. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V., Shamgulov R., Fediuk R., Sabitov L. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Т. 16. e01071.

26. Kadela Marta, Malek Marcin, Jackowski Mateusz, Kunikowski Mateusz, Klimek Agnieszka, Dudek, Daniel, Rośkiewicz Marek. Recycling of Tire-Derived Fiber: The Contribution of Steel Cord on the Properties of Lightweight Concrete Based on Perlite Aggregate. *Materials*. 2023. 16. 2124. 10.3390/ma16052124.

Дата поступления: 17.10.2024

Дата публикации: 23.01.2025