



Бесцементные бетоны на основе техногенных отходов Иркутской области

К.Ю. Вабищевич^{1✉}, С.В. Макаренко²,
О.В. Хохряков³, В.Г. Хозин⁴^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^{3,4}Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

Аннотации. На основе принятой мировой тенденции перехода от линейной экономики к экономике замкнутого цикла разработаны нормативные документы как на федеральном, так и на региональном уровне: «Стратегия развития строительных материалов РФ и Иркутской области», Постановление Правительства РФ от 02.08.2023 г. № 2094. Создан межрегиональный научно-образовательный центр «Байкал». Всё это преследует основную цель, направленную на получение технологий, позволяющих разработать эффективные строительные материалы на базе техногенных отходов и наладить производство. Предполагается получение эффективных строительных материалов на основе накопленных многотоннажных отходов на территории опережающего развития г. Усолье-Сибирское, таких как золошлаковые смеси теплоэлектроцентрали (90 млн т) и известкостержащие отходы, образовавшиеся при получении ацетилена на ПАО «Химпром» (более 9-ти млн т). Рассматривается принципиально новый подход получения искусственно синтезируемых новообразований бесцементного бетона на основе техногенных отходов, отвечающего требованиям нормативных стандартов в части морозостойкости и водостойкости, позволяющих применять его в ограждающих конструкциях. При рационально подобранном соотношении между известкостержащим отходом и золошлаковой смеси при условии соблюдения предварительно установленных принципов технологической подготовки, в части их механической активации, технологии смешивания, условий и продолжительности синтеза, возможно получение высококачественного безцементного бетона, отвечающего основным требованиям нормативной документации, предъявляемым к показателям качества.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, карбидный ил, известково-зольное вяжущее

Для цитирования: Вабищевич К.Ю., Макаренко С.В., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Бесцементные бетоны на основе техногенных отходов Иркутской области // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 625–634. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-625-634>. EDN: JLCCLU.

Original article

Cementless concretes, based on anthropogenic wastes of the Irkutsk Oblast

Kristina Yu. Vabishevich^{1✉}, Sergey V. Makarenko²,
Oleg V. Khokhryakov³, Vadim G. Khozin⁴^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^{3,4}Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia

Abstract. The accepted global trend of transition from a linear economy to a closed-loop one stimulated the development of regulatory documents, such as “Strategy for the development of building materials in the Russian Federation and Irkutsk Oblast”, Decree of the Government of the Russian Federation dated 08/02/2023 No. 2094, both at federal and regional levels. Further, the Baikal interregional scientific and educational centre was established. All this aims at obtaining technologies for developing effective building materials, based on technogenic wastes, and establishing the production. It is planned to obtain effective building materials, based on the accumulated high-tonnage

waste of the Ussolye-Sibirskoye priority development area, such as ash and slag mixtures of the combined heat and power plant (90 million tons) and lime-containing waste, generated during the production of acetylene at the Khimprom PJSC (more than nine million tons). The paper represents a fundamentally new approach to obtaining artificially synthesised newgrowths of cementless concrete, based on technogenic wastes, which meets the requirements of regulatory standards in terms of frost and water resistance and allows using this concrete in enclosing structures. At a rationally selected ratio between lime-containing wastes and an ash-slag mixture, subject to the pre-established principles of technological preparation in terms of their mechanical activation, mixing technology, conditions and synthesis duration, it is possible to obtain high-quality cementless concrete that meets the basic requirements of regulatory documents for quality indicators.

Keyword: ash and slag waste, carbide sludge, lime-ash binder

For citation: Vabishevich K.Yu., Makarenko S.V., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Cementless concretes, based on anthropogenic wastes of the Irkutsk Oblast. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(4): 625-634. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-625-634>. EDN: JLCCLU.

ВВЕДЕНИЕ

Иркутская область представляет собой регион с развитой топливно-энергетической отраслью промышленности [1–7]. По сведениям Министерства природных ресурсов и экологии Иркутской области, 45% российских угольных ТЭС находятся в Сибирском Федеральном округе (СФО) [8]. В процессе функционирования организаций электроэнергетики на территории регионов Сибири имеется более 500 млн т золошлаковых отходов (ЗШО), а среднегодовое приращение их тоннажа составляет около 13 млн т [9]. Из 13 золоотвалов Иркутской области уровень наполненности как минимум 5-ти приближается к критичной. Несомненно, что простое складирование золы и шлака малоэффективно как с экологической, так и с экономической точки зрения [10]. При этом повторное применение золошлаковых отходов находится на очень незначительном уровне. Обратимся к общемировой практике.

Европейские страны изучают данный вопрос. К примеру, в Дании и Нидерландах достигнуто почти 100%-е применение и вторичное использование ЗШО, еще в ряде стран этот параметр варьируется в пределах 70–95%. В России пока используется не более 10–12% угольных отходов – это не более 4 млн т золошлаков в год [11].

Не менее значительным является использование карбидного ила (карбидной извести) в г. Усолье-Сибирское. Шламохранилище предприятия «Усольехимпром», находящееся на территории г. Усолье-Сибирское, было определено для хранения шлама и жидких отходов производства карбида кальция, извести, эпихлоргидрина, трихлорэтилена [12]. Территория шламохранилища составляет примерно 130 га. С 2010 г. эксплуатирование

остановлено по причине несоответствия техническим требованиям [13]. В соответствии с отчетом ООО «Усольехимпром», тоннаж накопившегося шлама составляет 9 млн т [14].

Оптимальным подходом является применение отходов как сырья для производства бесцементных изделий, что позволит решить и экологические задачи, связанные со спецификой региона [15].

По данным ООО «ГС-Эксперт», в России по состоянию на 1 квартал 2015 г. исчислялось 93 силикатных предприятия [16]. Большая часть предприятий силикатного кирпича не только существенно увеличила ассортимент изделий из плотной силикатной массы, но и диверсифицировала производство за счет изготовления изделий из автоклавного бетона [17].

Использование автоклавного силикатного бетона и изделий на его основе, например, силикатного полнотелого кирпича в жилом строительстве, имеет длительную историю [18]. Активно использовать силикатный кирпич в домостроительстве стали в первой половине 1950-х гг. Жилые сооружения, построенные в это время, возводились в основном с использованием силикатного кирпича с размером наружной стены 640 мм [19].

На сегодняшний день изделия из силикатного бетона прочно занимают свое место среди материалов строительного рынка; в процессе каркасного домостроения на смену силикатному кирпичу приходят более высокоэффективные газосиликатные блоки, применяемые в ограждающих конструкциях [20].

Следовательно, задачи улучшения эффективности и оптимизации структуры силикатного бетона являются на сегодняшний день актуальными [21].

МЕТОДЫ

Для определения свойств и состава исходного сырья были проведены следующие инструментальные анализы: степень измельчения оценивалась методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе *Microtrac S3500* [22].

Суть метода – определение размеров частиц. Метод основывается на регистрации света от исследуемых частиц, образующего дифракционную картинку от угла рассеяния света [23]. Рентгенофазовый анализ карбидного ила и золошлаковой смеси получен с использованием дифрактометра *D8 ADVANCE Bruker* [24]. Дифрактограммы снимались при пошаговом режиме в диапазоне дифракционных углов 2θ от 3 до 70 градусов с использованием $\text{CuK}\alpha$ -источника излучения [25]. Эксперименты выполнены при комнатной температуре в геометрии Брэгг-Брентано с плоским образцом.

Экспериментальные условия следующие: 40 kV, 40 mA, время экспозиции – 2 с, размер шага – $0,02^\circ 2\theta$ [26]. Обработка полученных данных выполнена с использованием пакета программных средств *DIFFRACplus*. Образцы идентифицированы с помощью структурной Базы данных порошковой дифрактометрии PDF-2 (ICDD, 2007) по наилучшему совпадению штрих-диаграмм эталонов с эксперимен-

тальной дифрактограммой, и индцированы с применением программного обеспечения *EVA (Bruker)* [27]. Предел обнаружения фаз и погрешность составляет 1–5%.

Удельную поверхность карбидного ила и золошлаковой смеси оценивали при помощи ПСХ-12 [28]. Также по стандартной методике оценивались физико-механические характеристики плотности и прочности на сжатие полученного известково-золяного камня по ГОСТ 379-2015¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав зол различен [29]. Размер зерен находится в пределах 1–200 мкм [30]. Содержание фракций более 85 мкм не превышает 20%, размером 30–40 мкм – около 50%. Более крупные фракции золы образуются при повышенном содержании в минеральной части топлива оксидов плавней CaO и Fe_2O_3 .

Удельная эффективная активность природных радионуклидов по ГОСТ 30108-94², 350 Бк/кг.

Анализируя результаты лазерной дифракции золы ТЭЦ-10 (табл. 1 и 2), можно сделать следующее заключение: зерна минимального размера 0,9 мкм – около 10% от общего количества; наибольшее количество составляют зерна с размером порядка 15,9 мкм – около 90% (табл. 3).

Таблица 1. Зерновой состав ЗШО ТЭЦ-10 согласно паспорту**Table 1.** Grain composition of AShO TPP-10 according to the passport

Размер ячейки сита, мм	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	П
Частные остатки, % по массе	0,0	0,0	0,0	0,1	0,75	5,06	94,08
Полные остатки, % по массе	0,0	0,0	0,0	0,1	0,86	5,92	100,00

Таблица 2. Технические характеристики ЗШО ТЭЦ-10 согласно паспорту**Table 2.** Technical characteristics of AShO TPP-10 according to the passport

Показатель	Результат испытаний
Влажность, %	18,95
Насыпная плотность золошлаковой смеси (в естественном состоянии), кг/м ³	925
Полный остаток на сите № 008, %	31,4
Удельная поверхность, м ² /кг	206,2
Потеря массы при прокаливании, %	0,57
Равномерность изменения объема	обеспечивается
Степень пучинистости, %	0,01
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,14
Истинная плотность, г/см ³	1,97
Средняя плотность, г/см ³	1,37
Пористость, %	43,16
Коэффициент водонасыщения	0,57
Стойкость против силикатного и железистого распада	обеспечивается
Засоряющие включения	не содержит

¹ГОСТ 379-2015 Кирпич, камни, блоки и плиты силикатные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 36 с.

²ГОСТ 30108-94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. М.: Стандартинформ, 2007. 10 с.

Таблица 3. Размер частиц и их минимальное процентное содержание в ЗШО ТЭЦ-10
Table 3. Particle size and their minimum percentage content in the ASH of TPP-10

Размер частиц, мкм	Q3(x), %
0,9	10
1,4	20
2,1	30
3	40
4,3	50
6,4	60
9	70
11,9	80
15,8	90

Таблица 4. Размер частиц и их минимальное процентное содержание в карбидном иле
Table 4. Particle size and minimum percentage content in carbide sludge

Размер частиц, мкм	Q3(x), %
0,7	10
1,4	20
2,2	30
3,6	40
6,2	50
12	60
18,7	70
25,7	80
35,6	90

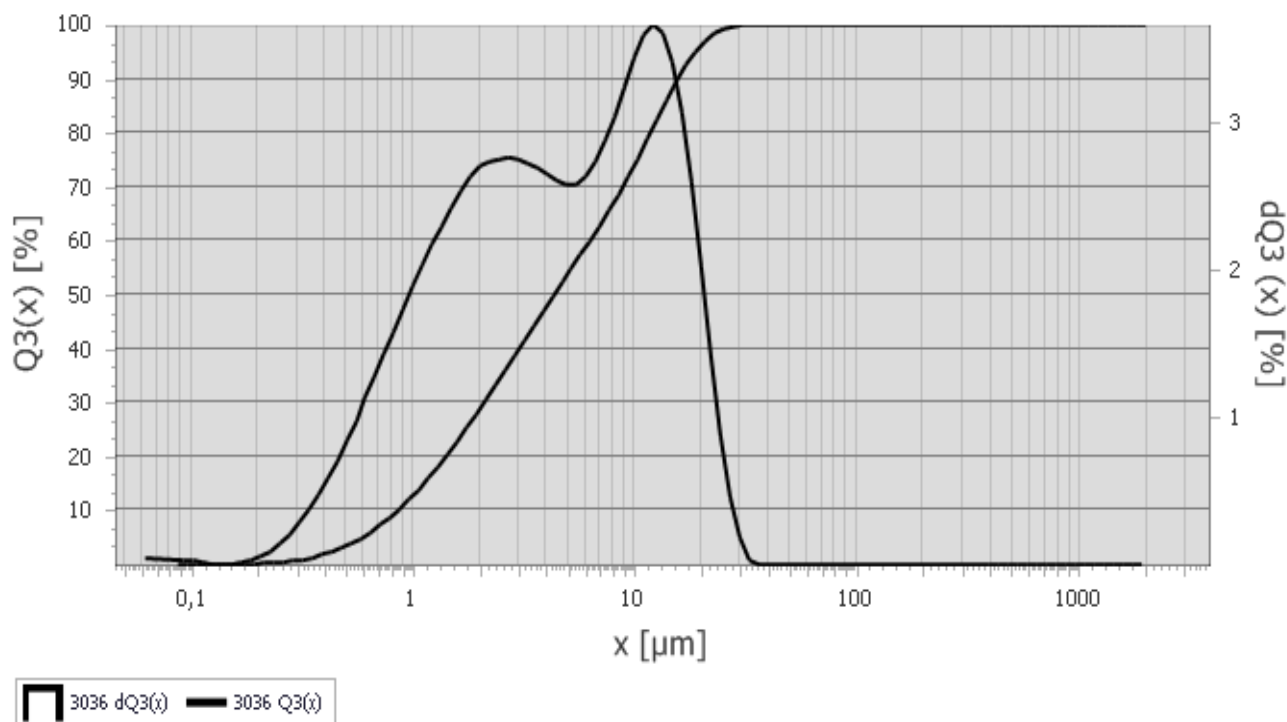


Рис. 1. Логарифмическая и интегральные кривые распределения частиц золы ТЭЦ-10 по размерам

Fig. 1. Logarithmic and integral criteria for the size distribution of ash particles at TPP-10

Анализируя результаты лазерной дифракции карбидного ила, можно сделать следующее заключение: зерен минимального размера 0,7 мкм – около 10% от общего количества. Наибольшее количество составляют зерна с размером порядка 35,6 мкм – около 90% (табл. 4). Результаты химического состава исследуемой ЗШС представлены в табл. 5. Результаты химического состава исследуемого карбидного ила представлены в табл. 6. Для установления ключевых факторов было проведено 5 экспериментов.

Постоянными факторами являлись: давление прессования 25 МПа и максимальное давление автоклавной обработки 12 Атм.

Переменными факторами являлись:

- изотермическая выдержка (8 и 12 ч);
- соотношение карбидный ил : ЗШО – 10:90 и 20:80;
- удельная поверхность компонентов вяжущего – 2000 и 6000;
- влажность смеси – 10% и 20%;

Результаты экспериментов приведены в табл. 7.

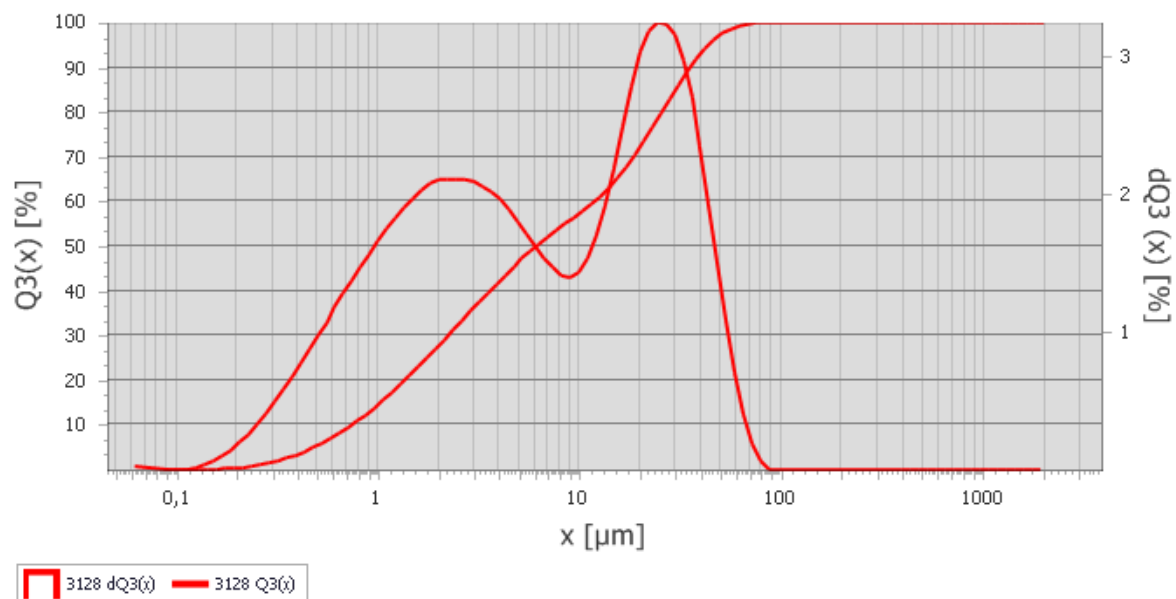


Рис. 2. Логарифмическая и интегральные кривые распределения частиц карбидного ила по размерам

Fig. 2. Logarithmic and integral curves of carbide sludge particle size distribution

Таблица 5. Химический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-11

Table 5. Chemical composition of the ash and slag mixture at TPP-11

Показатель	Значение, %
SiO ₂	50,4
Al ₂ O ₃	28,8
Fe ₂ O ₃ общ.	11,5
MgO	1,3
CaO	4,8
п.п.п.	2
сумма	98,8
SO ₃	2

Таблица 6. Химический состав карбидного ила

Table 6. Chemical composition of carbide sludge

Содержание, %%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca(OH) ₂	MgOH	K ₂ O	MnO	SO ₃	п.п.п.
Максимальное	1,84	0,74	0,43	69,7	0,75	0,067	0,079	0,22	26,17
Минимальное	1,82	0,70	0,40	69,4	0,72	0,059	0,073	0,19	26,64
Среднее из 3 проб	1,83	0,72	0,41	69,5	0,74	0,063	0,074	0,21	26,42

Таблица 7. Результаты экспериментов

Table 7. Experimental results

№ эксперимента	Средняя прочность, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Марка по прочности силикатного кирпича
1	10,5	1600	M100
2	13,5	1600	M125
3	15,6	1600	M150
4	15,2	1600	M150
5	13,2	1700	M125

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены образцы бесцементного бетона, которые по предварительным данным могут являться основой для проведения даль-

нейших исследований в выбранной области с целью повышения полученных показателей.

2. Доказана возможность синтеза искусственного камня на основе техногенных отхо-

дов промышленности, используемых в работе, установлены ключевые факторы влияния
3. Установлены показатели прочности, соотносимые с требуемыми показателями проч-

ности, указанными в ГОСТ 379-2015¹ на силикатный кирпич таких марок как М150, М125, М100, М75.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семенов А.А. Рынок силикатных стеновых материалов и вопросы сырьевого обеспечения отрасли // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 40–43. EDN: VHZZXF.
2. Кузнецова Г. В. Запаривание силикатного кирпича в автоклаве // Строительные материалы. 2015. № 10. С. 10–14. EDN: UXCFDL.
3. Рязанов А.Н., Винниченко В. И., Недосеко И. В., Рязанова В. А., Рязанов А. А. Структура и свойства известково-золяного цемента и его модификация // Строительные материалы. 2018. № 1–2. С. 18–22. EDN: YRQXTA.
4. Котляр В.Д., Козлов А.В., Животков О.И., Козлов Г.А. Силикатный кирпич на основе золяных микросфер и извести // Строительные материалы. 2018. № 9. С. 17–21. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-17-21>. EDN: XZJALZ.
5. Семёнов А.А. Силикатный кирпич и газосиликат. Некоторые тенденции рынка в 2018–2019 гг. // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 3–5. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-3-5>. EDN: TFUZFQ.
6. Нелюбова В.В., Строкова В.В. Технология силикатных прессованных материалов. Обзор новаций для развития производства // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 6–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-6-13>. EDN: QRDGQK.
7. Столбоушкин А.Ю. Получение силикатных материалов с добавкой тонкомолотого мартеновского шлака // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 26–32. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32>. EDN: HXCRQH.
8. Кузнецова Г.В. Дробление извести в производстве известково-кремнеземистого вяжущего на действующих заводах силикатного кирпича // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 14–17. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-14-17>. EDN: GLSRDW.
9. Русина В.В., Шестакова Ю.А. Бесклинкерные вяжущие вещества на основе торфяной золы // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 70–74. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-70-74>. EDN: LGLIFV.
10. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Добавка для автоклавного газобетона на быстрогасящейся извести // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 4–8. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-4-8>. EDN: XUPJGY.
11. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Попов А.Л. Силикатный кирпич с использованием минеральных модификаторов различного состава // Строительные материалы. 2021; № 1–2. С. 115–120. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-115-120>. EDN: OIKEMK.
12. Безродных А.А., Строкова В.В., Маркова И.Ю., Потапов Д.Ю. Битумные эмульсии дорожно-строительного назначения, модифицированные золами-уноса // Строительные материалы. 2021. № 11. С. 59–66. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-59-66>. EDN: UEIQIT.
13. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 73–79. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>. EDN: NIIVPI.
14. Кожухова Н. И., Данакин Д. Н., Жерновский И. В. Особенности получения геополимерного газобетона на основе золы-уноса Новотроицкой ТЭЦ // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 113–117. EDN: XXHXF.
15. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И., Смирнова А.С. Российский рынок автоклавного газобетона. Итоги 2016 года // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 49–51. EDN: YHZYJF.
16. Нестеров А.В., Датукашвили Д.О. Производство кальцевой извести в России // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 52–60. EDN: YHZYJP.
17. Ngo Van Toan. Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash // Journal Building Materials – Environment. 2012. Iss. 4. P. 36–45.
18. Tang Lam Van, Bulgakov B., Aleksandrova O., Anh N.P. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior // 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction –

- The Formation of Living Environment (FORM) (25-27 April 2018). Moscow: Moscow state university of civil engineering, 2018. Vol. 365. P. 032007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3>.
19. Aranda M.A.G., De la Torre A.G. Sulfoaluminate cement // *Eco-efficient concrete*. 2013. P. 488–522. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.4.488>.
20. Martin L.H., Winnefeld F., Tschopp E., Müller C.J., Lothenbach B. Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement // *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 95. P. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.030>.
21. Tang Van Lam, Bulgakov B., Bazhenova S., Aleksandrova O., Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu, et al. Effect of rice husk ash and fly ash on the workability of concrete mixture in the high-rise construction // *E3S Web of Conferences*. January. 2018. Vol. 33. Iss. 28. P. 02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302029>.
22. Xue Z., Gong Y., Guo Q., Wang F., Guangsu Yu. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier // *Fuel*. 2019. Vol. 244. Iss. 3. P. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.186>.
23. Ju Hyoung Park, Young Joo Lee, Min Ho Jin, Se Joon Park, Dong Wook Lee, Jong Soo Bae, et al. Enhancement of slurryability and heating value of coal water slurry (CWS) by torrefaction treatment of low rank coal (LRC) // *Fuel*. 2017. Vol. 203. P. 607–617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.016>.
24. Dmitrienko M.A., Nyashina G. S., Strizhak P. A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 338. P. 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.031>. EDN: XNGLFA.
25. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste // *Energy Fuels*. 2016. Vol. 30. Iss. 4. P. 3441–3450. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02881>.
26. Chukaeva M., Zaytseva T., Matveeva V., Sverchkov I. Purification of Oil-Contaminated Wastewater with a Modified Natural Adsorbent // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2021. Vol. 22. Iss. 2. P. 46–51. <https://doi.org/10.12912/27197050/133331>.
27. Matveeva V.A., Isakov A.E., Sverchkov I.P. The reduction of negative impact on environment in the area of coal processing enterprises // *Innovation-based development of the mineral resources sector: challenges and prospects* // 11th Conference of the Russian-German raw materials (Potsdam, 07–08 November 2018). Potsdam, 2019. Vol. 1. P. 431–436. EDN: VTETYT.
28. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005. Vol. 131. P. 914–924. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).
29. Ogunro V.O., Inyang H.I., Hooper F., et al. Gradation Control of Bottom Ash Aggregate in Superpave Bituminous Mixes // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. P. 604–613. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(604\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(604)).
30. Marinin M.A., Dolzhikov V.V., Isheyskiy V.A. Improving the efficiency of drilling and blasting operations for high water cut conditions // *Journal of Mining Science*. 2019. 55(5). P. 783–788. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.124>.

REFERENCES

1. Semenov A. A. Silicate wall materials market and problems of providing industry with raw materials. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2015;12:40–43. (In Russ.). EDN: VHZXXF.
2. Kuznetsova G. V. Steam curing of silicate brick in autoclave. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2015;10:10–14. (In Russ.). EDN: UXCFDL.
3. Riazanov A. N., Vinnichenko V. I., Nedoseco I. V., Riazanova V. A., Riazanov A. A. Structure and properties of lime-ash cement and its modification. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2018;1–2:18–22. (In Russ.). EDN: YRQXTA.
4. Kotlyar V. D., Kozlov A. V., Zhivotkov O. I., Kozlov G. A. Calcium-silicate brick on the basis of microspheres and lime. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2018;9:17–21. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-17-21>. EDN: XZJALZ.
5. Semenov A. A. Silicate brick and gas silicate. Some trends at the market in 2018–2019. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;8:3–5. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-3-5>. EDN: TFUZFG.
6. Nelyubova V. V., Stokova V. V. Technology of silicate pressed materials. review of innovations for the development of production. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;8:6–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-6-13>. EDN: QRDGQK.
7. Stolboushkin A. Yu. Production of silicate materials with addition of fine-ground open-hearth furnace slag.

- Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;8:26-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32>. EDN: HXCRQH.
8. Kuznetsova G. V. Crushing of lime in the production of lime - silica binder at operating plants of silicate bricks. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;8:14-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-14-17>. EDN: GLSRDW.
9. Rusina V. V., Shestakova Yu. A. Clinkerless binders based on peat ash. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;10:70-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-70-74>. EDN: LGLIFV.
10. Kuznetsova G. V., Morozova N. N. Additive for autoclave aerated concrete on quick-slaking lime. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2020;9:4-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-4-8>. EDN: XUPJGY.
11. Nelubova V. V., Stroikova V. V., Popov A. L. Silicate brick using mineral modifiers of various composition. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2021;1-2:115-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-115-120>. EDN: OIKEMK.
12. Bezrodnykh A. A., Stroikova V. V., Markova I. Yu., Potapov D. Yu. Bitumen emulsions for road construction purposes, modified by fly ash. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2021;11:59–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-59-66>. EDN: UEIQIT.
13. Petropavlovskaya V. B., Zavadko M. Y., Novichenkova T. B., Petropavlovskii K. S., Buryanov A. F. Prospects for the bottom ash from hydraulic removal use if in dry building mixtures. Part 1. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2023;4:73-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>. EDN: NIIVPI.
14. Kozhukhova N. I., Danakin D. N., Zhernovsky I. V. Features of producing geopolymeric gas concrete on the basis of fly ash OF Novotroitskaya TPS. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2017;1-2:113-117. (In Russ.). EDN: XXIXXF.
15. Vishnevsky A. A., Grinfeld G. I., Smirnova A. S. Russian market of autoclave gas concrete. Results of 2016. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2017;3:49-51. (In Russ.). EDN: YHZYJF.
16. Nesterov A. N., Datukashvili D. O. Production of high-calcium lime in Russia. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2017;3:52-59. (In Russ.). EDN: YHZYJP.
17. Ngo Van Toan. Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash. *Journal Building Materials – Environment*. 2012;4:36-45.
18. Lam Van Tang, Bulgakov B., Aleksandrova O., Anh N.P. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. In: *21st International scientific conference on advanced in civil engineering construction – The formation of living environment (FORM)*. 25-27 April 2018, Moscow. Moscow: Moscow state university of civil engineering; 2018. Vol. 365. p. 032007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3>.
19. Aranda M.A.G., De la Torre A.G. Sulfoaluminate cement. Eco-efficient concrete. 2013. P. 488–522. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.4.488>.
20. Martin L.H., Winnefeld F., Tschopp E., Müller C.J., Lothenbach B. Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*. 2017;95:152-163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.030>.
21. Tang Van Lam, Bulgakov B., Bazhenova S., Aleksandrova O., Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu, et al. Effect of rice husk ash and fly ash on the workability of concrete mixture in the high-rise construction. In: *E3S Web of Conferences*. January 2018. 2018;33(28):02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302029>.
22. Xue Z., Gong Y., Guo Q., Wang F., Guangsu Yu. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier. *Fuel*. 2019;244(3):40-47. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.186>.
23. Park J.-H., Lee Y.-J., Jin M.-H. et. al. Enhancement of slurryability and heating value of coal water slurry (CWS) by torrefaction treatment of low rank coal (LRC). *Fuel*. 2017;203:607-617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.016>.
24. Dmitrienko M. A., Nyashina G. S., Strizhak P. A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals. *Journal of Hazardous Materials*. 2017;338:148-159. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.031>. EDN: XNGLFA.
25. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste. *Energy Fuels*. 2016;30(4):3441-3450. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02881>.
26. Chukaeva M., Zaytseva T., Matveeva V., Sverchkov I. Purification of Oil-Contaminated Wastewater with a Modified Natural Adsorbent. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2021;22(2):46-51.

<https://doi.org/10.12912/27197050/133331>.

27. Matveeva V.A., Isakov A.E., Sverchkov I.P. The reduction of negative impact on environment in the area of coal processing enterprises. In: *Innovation-based development of the mineral resources sector: challenges and prospects: 11th Conference of the Russian-German raw materials*. 07-08 November 2018, Potsdam. Potsdam; 2019. Vol. 1. p. 431–436. EDN: VTETYT.

28. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005;131:914-924. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).

29. Ogunro V.O., Inyang H.I., Hooper F. et al. Gradation Control of Bottom Ash Aggregate in Super-pave Bituminous Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004;16:604-613. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(604\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(604)).

30. Marinin M.A., Dolzhikov V.V., Isheyskiy V.A. Improving the efficiency of drilling and blasting operations for high water cut conditions. *Journal of Mining Science*. 2019;55(5):783-788. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.124>.

Информация об авторах**Вабищевич Кристина Юрьевна,**

соискатель,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kristina-lebedev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9956-4214>
Author ID: 932484

Макаренко Сергей Викторович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры
строительного производства
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: makarenko_83_07@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9735-2795>
Author ID: 1133127

Хохряков Олег Викторович,

к.т.н., доцент кафедры
технологии строительных материалов,
изделий и конструкций,
Казанский государственный архитектурно-
строительный университет,
420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, Россия,
e-mail: olvik@list.ru
Author ID: 615854

Хозин Вадим Григорьевич,

д.т.н., профессор кафедры
технологии строительных материалов,
изделий и конструкций,
Казанский государственный архитектурно-
строительный университет,
420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1,
Россия
e-mail: khozin.vadim@yandex.ru
Author ID: 43534

Information about the authors**Kristina Yu. Vabishevich,**

Applicant,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail kristina-lebedev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9956-4214>
Author ID: 932484

Sergey V. Makarenko,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Construction Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: makarenko_83_07@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9735-2795>
Author ID: 1133127

Oleg V. Khokhryakov,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor
of the Department of Technology
of Building Materials, Products and Structures,
Kazan State University of Architecture
and Civil Engineering
1 Green St., Kazan 420043, Russia,
e-mail: olvik@list.ru
Author ID: 615854

Vadim G. Khozin,

Doctor Sci (Eng.), Professor Department
of Technology of Building Materials,
Products and Structures,
Kazan State University of Architecture and Civil
Engineering, Kazan e-
420043, the Republic of Tatarstan, the city of
Kazan, Green Street, 1,
e-mail: khozin.vadim@yandex.ru
Author ID: 43534

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023.
Одобрена после рецензирования 18.09.2023.
Принята к публикации 20.09.2023.

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023.
Approved after reviewing 18.09.2023.
Accepted for publication 20.09.2023.