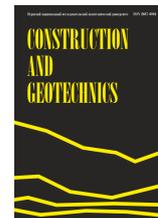




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 2, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.08

УДК 691.3

ПЫЛЬ ГАЗООЧИСТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК КОМПОНЕНТ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК В ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ

С.В. Степанов, Д.Б. Макаров, М.А. Копылов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Казань, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 24 января 2024
Одобрена: 22 декабря 2024
Принята к публикации:
2 июня 2025

Ключевые слова:

бетон, прочность, цемент, промышленные отходы, утилизация, химические добавки.

АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день в Российской Федерации очень остро стоит вопрос с утилизацией промышленных отходов. Приведенный в статье анализ показал, что ежегодно объемы таких отходов возрастают на 10–20 %. Использование отходов при производстве строительных материалов является одним из эффективных способов их утилизации, зачастую не требующих специальной подготовки отходов к применению в качестве сырьевого компонента. В статье приведены результаты исследования влияния введения пыли металлургических предприятий, которая образуется при очистке газов электроплавильных печей, на свойства цементного теста и камня, а также на прочностные свойства мелкозернистого бетона.

Выявлено, что введение пыли позволяет увеличить прочностные свойства бетона в марочном возрасте. Также выявлен положительный эффект от совместного введения с суперпластификатором С-3, на прочностные характеристики бетона. Также выявлено, что введение пыли существенно увеличивает сроки схватывания цементного теста, что приводит к увеличению сохраняемости подвижности бетонной смеси. Данный эффект позволит существенно снизить экзотермический эффект и снизить внутренние напряжения при твердении бетона, вследствие чего увеличить объем бетонирования конструкции.

© Степанов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: stepanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-4926-8537.

Макаров Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: makarov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-6879-0369.

Копылов Матвей Алексеевич – студент, e-mail: matvey.kopylov.01@mail.ru.

Sergey V. Stepanov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: stepanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-4926-8537.

Dmitry B. Makarov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: makarov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-6879-0369.

Matvei A. Kopylov – Student, e-mail: matvey.kopylov.01@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GAS CLEANING DUST OF METALLURGICAL ENTERPRISES AS A COMPONENT OF CHEMICAL ADDITIVES IN CEMENT CONCRETES

S.V. Stepanov, D.B. Makarov, M.A. Kopylov

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 January 2024
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
02 June 2025

Keywords:

concrete, strength, cement,
industrial waste, recycling,
chemical additives.

ABSTRACT

Today, the Russian Federation faces a very acute issue with industrial waste disposal. The analysis presented in the article showed that the volume of such waste increases by 10-20 % annually. The use of waste in the production of building materials is one of the effective ways to utilize it, which often does not require special preparation of waste for use as a raw material component. The article presents the results of a study of the effect of introducing dust from metallurgical enterprises, which is formed during the purification of gases from electric smelting furnaces, on the properties of cement paste and stone, as well as on the strength properties of fine-grained concrete.

It was found that the introduction of dust in quantity allows increasing the strength properties of concrete at the brand age. A positive effect from the combined introduction with superplasticizer C-3 on the strength characteristics of concrete was also revealed. It was also found that the introduction of dust significantly increases the setting time of the cement paste, which leads to an increase in the stability of the mobility of the concrete mixture. This effect will significantly reduce the exothermic effect and reduce internal stresses during the hardening of concrete, and as a result, increase the volume of concreting of the structure.

Введение

С увеличением количества промышленных производств в последние годы в России происходит увеличение образуемых отходов [1–3]. В результате анализа исследования [4] выявлено, что в 2021 г. в России было образовано 8,45 млрд т отходов (рис. 1, табл. 1).

Практически 90 % промышленных отходов, произведенных в 2021 г., приходится на угольную отрасль (5 млрд т) и металлургическую (2,4 млрд т).

Большая часть отходов образуется на добывающих предприятиях [5–7]. Практически 90 % из добываемого минерального сырья после переработки отправляется в отвалы в виде промышленных отходов либо возвращается в шахты и карьеры для закладки выработанных пространств.

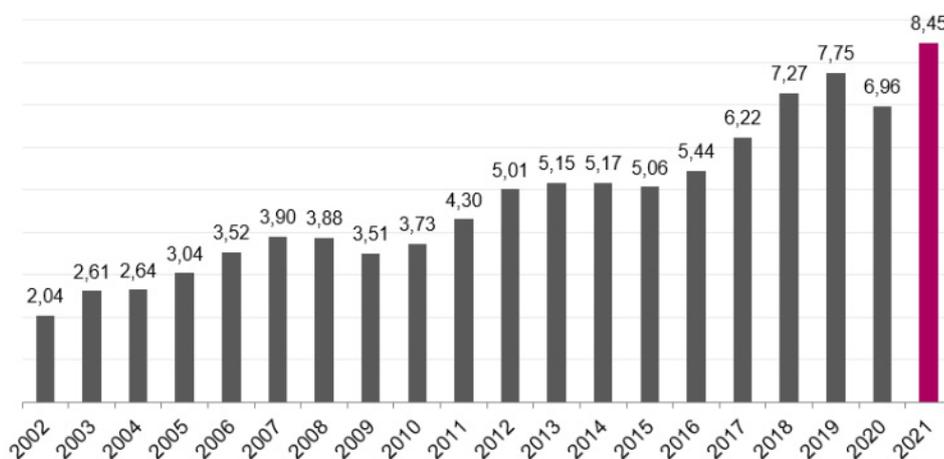


Рис. 1. Динамика увеличения объема отходов за 2002–2021 гг., млрд т

Fig. 1. Dynamics of waste volume increase in 2002–2021, billion tons

Таблица 1

Регионы РФ – лидеры с максимальным приростом объема
 производственных отходов [5]

Table 1

The leaders are the regions of the Russian Federation
 with the maximum increase in the volume of industrial waste [5]

№ п/п	Регион РФ	Прирост производственных отходов, млн т
1	Кемеровская область	873,0
2	Красноярский край	150,2
3	Республика Бурятия	83,3
4	Новосибирская область	77,4
5	Иркутская область	60,8
6	Республика Хакасия	60,4
7	Хабаровский край	59,5
8	Челябинская область	45,9
9	Республика Саха	45,4
10	Магаданская область	40,8

Количество отходов, образуемых на металлургических предприятиях, составляет 119 млн т в год. В частности на металлургических предприятиях образуется пыль газоочистки дуговой электросталеплавильной печи, которая представляет собой высокодисперсный сухой порошок (рис. 2).



Рис. 2. Распределение промышленных отходов по сферам деятельности в 2021 г., млн т

Fig. 2. Distribution of industrial waste by areas of activity in 2021, million tons

Известны способы переработки промышленных отходов, в процессе которых из отходов извлекают ценные металлы и вещества для дальнейшего использования [8–10].

Также известны способы, когда промышленные отходы являются компонентами при производстве строительных материалов [11–15]: керамических изделий, полимерных, а также цементных систем [16–20]. На сегодня самым распространенным и востребованным видом строительных материалов является бетон, объемы производства которого в мире достигают 10 млрд м³ в год [21].

На сегодня в России преобладает монолитное домостроение. Соотношение панельного и монолитного строительства составляет 35/65 [22]. Монолитное строительство все больше развивается, особенно в крупных городах, где зачастую возникают проблемы с транспортировкой готовой бетонной смеси на строительную площадку, а именно: необходимость транспортировки готовой бетонной смеси на большие расстояния; заторы на дорогах (пробки); высокая температура в летний период. Для решения данных проблем на предприятиях применяют модификаторы твердения цементных бетонов – замедлители твердения. Введение данных модификаторов приводит к уменьшению тепловыделения бетонной смеси и сохранению технологических и реологических свойств бетонных смесей [23–25].

В работе рассмотрено влияние пыли газоочистки металлургических предприятий на цементные системы, в качестве компонента замедлителя твердения цементных бетонов.

Характеристика материалов и методы исследования

Пыль газоочистки дуговой электросталеплавильной печи, представляет собой тонкодисперсный порошок коричневого цвета (рис. 3).

Химический состав пыли газоочистки приведен в табл. 2.



Рис. 3. Пыль газоочистки дуговой электросталеплавильной печи

Fig. 3. Gas cleaning dust of the electric arc furnace

Истинная плотность пыли газоочистки дуговой электросталеплавильной печи составляет $\rho_n = 4,19 \text{ г/см}^3$, она определялась стандартной методикой прибором Ле-Шателье.

В исследовании использовался суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ СП-1» (далее С-3), представляет собой смесь нейтрализованных едким натром полимерных соединений, которые получают при конденсации сульфокислот нафталина с формальдегидом.

Выбор суперпластификатора и дозировки обуславливался наибольшей распространенностью данного вида добавки при производстве бетонов и оптимальной дозировкой, рекомендованной производителем добавок.

Таблица 2

Химический состав пыли газоочистки дуговой электросталеплавильной печи

Table 2

Chemical composition of gas cleaning dust of the electric arc furnace

Определяемые компоненты	Результат определения, мас. %
Алюминий	0,4±0,1
Вода	<0,1
Железо (в пересчете на оксид)	48,46±4,9
Калий	1,5±0,3
Кальций (в пересчете на оксид)	10,0±1,0
Кислород	10,71
Кремния диоксид	8,0±0,8
Магний	1,5±0,4
Марганец	2,4±0,6
Медь	0,20±0,05
Натрий	2,2±0,5
Свинец	0,8±0,2
Сера	0,80±0,08
Сульфат-ион	0,7±0,2
Углерод	0,30±0,03
Хлорид-ион	1,0±0,3
Цинк	10,8±1,1
pH	12,0

Результаты и обсуждение

Пыль газоочистки (далее Пг) представляет собой высокодисперсный сухой материал, соответственно отсутствует необходимость в предварительной сушке либо помоле.

Для определения технологических свойств цементного теста пыль газоочистки перемешивалась с цементом в определенных пропорциях, а затем добавлялась вода затворения, в которой был разведен суперпластификатор С-3. Дозировка пыли составила 1, 3, 5 % от массы цемента.

Таблица 3

Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста

Table 3

Normal density and setting time of cement dough

Состав	Нормальная густота, %	Начало схватывания, ч : мин	Конец схватывания, ч : мин
Ц	29,0	1:51	2:37
Ц+Пг (1 %)	30,0	2:33	3:37
Ц+Пг (3 %)	31,0	4:42	7:08
Ц+Пг (5 %)	32,0	5:28	7:31

В результате введения пыли в цемент увеличивается водопотребность цементного теста. Увеличение нормальной густоты составило до 10 % в зависимости от массы пыли. Увеличение нормальной густоты может привести к потере прочности цементного камня, по-

этому целесообразно совместно с пылью вводить супрелластифицирующие добавки. Из табл. 3 также видно, что введение пыли существенно увеличивает сроки схватывания цементного теста. Данный эффект может положительно повлиять на сохраняемость подвижности бетонной смеси. Увеличение сохраняемости, позволит увеличить дальность транспортировки бетонной смеси при монолитном строительстве.

Также было исследовано влияние пыли газоочистки на прочностные характеристики цементного камня.

Из рис. 4 видно, что введение пыли газоочистки положительно сказывается на кинетике твердения цементного камня. При введении пыли прочность цементного камня увеличивается во все сроки твердения. Однако при введении пыли в количестве 3 % от массы цемента цементный камень можно было испытать лишь на 3-и сутки твердения, а 5 % – только на 7-е сутки твердения, при этом прочность на 28-е сутки твердения на 13 % выше бездобавочного состава.

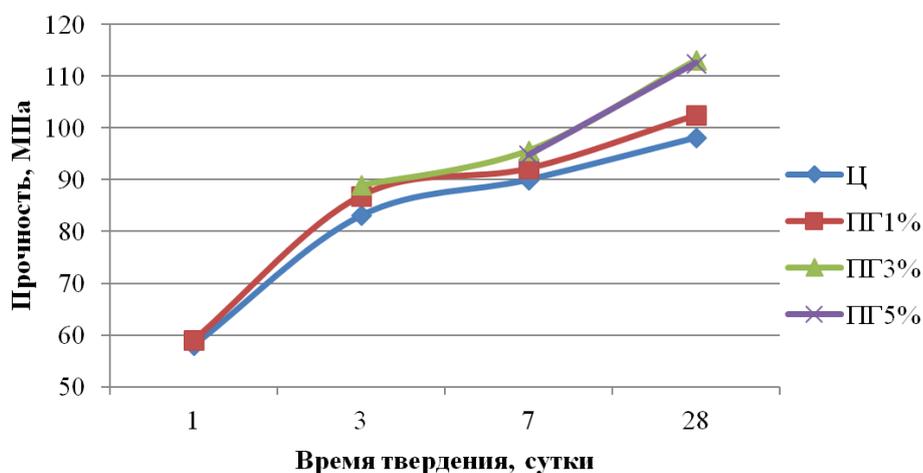


Рис. 4. Прочность цементного камня

Fig. 4. Strength of cement stone

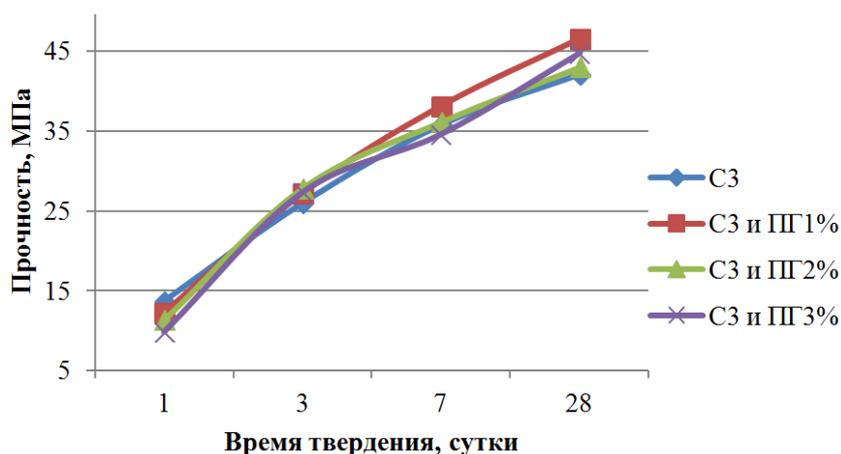


Рис. 5. Прочность мелкозернистого бетона

Fig. 5. Strength of fine-grained concrete

Также проводились испытания при совместном введении Пг и супрелластификатора С3. Введение С-3 позволило сократить водопотребление, что положительно повлияло при наборе прочности.

Дальше проводилось исследование влияния Пг на прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Пыль газоочистки добавлялась в количестве 1, 2, 3 % и в присутствии суперпластификатора С-3 в количестве 0,6 % от массы цемента.

Из рис. 5 видно, прочность бетона, содержащего Пг, в первые сутки твердения ниже, чем без нее. На третьи сутки твердения прочность всех образцов мелкозернистого бетона выравнивается. При испытании бетона на 28-е сутки твердения максимальная прочность 47 МПа достигается при введении пыли в количестве 1 % от массы цемента, что на 10 % больше, чем состав только с суперпластификатором.

Заключение

1. В результате исследования показано, что пыль газоочистки дуговой электростале-плавильной печи можно использовать в виде компонента химической добавки, замедляющей процессы твердения.

2. Введение пыли в количестве 5% от массы цемента увеличивает сроки схватывания практически в 3 раза.

3. Выявлено, что пыль газоочистки позволяет увеличить прочность цементного камня во все сроки твердения.

4. Введение пыли в состав мелкозернистого бетона в количестве 1 % от массы цемента позволяет увеличить прочность бетона на 10 % в 28-е сутки твердения относительно состава без пыли.

5. Введение пыли газоочистки совместно с суперпластификатором существенно замедляет процессы гидратации цемента в бетоне, что позволяет увеличить время сохранности бетонной смеси. Данный эффект является положительным при транспортировке бетонной смеси на строительные объекты при монолитном строительстве.

Финансирование. *Исследование не имело спонсорской поддержки.*

Конфликт интересов. *Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Вклад авторов. *Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.*

Библиографический список

1. Алеева, Э.Р. Промышленные отходы электростанции / Э.Р. Алеева, А.Х. Агадуллина // Обращение с отходами: современное состояние и перспективы: сб. тр. конф. – Уфа, 2018. – С. 114–117.

2. Рахимов, Р.З. Топливо-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества / Р.З. Рахимов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 3(61). – С. 67–74. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67

3. Ермилова, Е.Ю. Композиционные портландцементы с комплексными минеральными добавками как решение проблемы утилизации техногенных отходов промышленности / Е.Ю. Ермилова, З.А. Камалова // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2023. – № 2(3). – С. 4–10.

4. OpenMP: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/rek-kol-otkhod-pred/> (дата обращения: 02.11.2023).

5. Джевага, Н.В. Промышленные отходы в горнодобывающей отрасли: современное состояние и пути решения проблем / Н.В. Джевага, Т.И. Чухланцева // Наука, технологии,

общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сб. тр. конф. – Красноярск, 2022. – С. 210–216.

6. Абдрахимов, В.З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты / В.З. Абдрахимов // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 82–95. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07

7. Чапаев, Т.М. Проблема утилизации карьерных и промышленных отходов для производства строительных материалов / Т.М. Чапаев // Сб. науч. тр. XI Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика Андрея Дмитриевича Сахарова: сб. тр. конф. – Нальчик, 2021. – С. 230–234.

8. Получение аморфного диоксида кремния из промышленных отходов / С.Б. Ярусова, Г.Ф. Крысенко, П.С. Гордиенко, И.А. Балахнин // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: сб. тр. конф. – Киров, 2021. – С. 10–13.

9. Москальчук, Л.Н. Использование природного сырья и промышленных отходов для производства сорбентов радионуклидов / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, Т.Г. Леонтьева // Передовые технологии и материалы будущего: сб. тр. конф. – Минск, 2021. – С. 218–223.

10. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review / J. Jinrong, F. Yali, L. Naoran, X. Chenglong, X. Zhonghua, W. Ben // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 457. – P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

11. Колесников, Р.С. Промышленные отходы горного производства и их использование на примере Лебединского ГОКа / Р.С. Колесников // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сб. тр. конф. – Белгород, 2017. – С. 2611–2216.

12. Chee, B.C. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review / B.C. Chee, E.T. Leng, R. Mahyuddin // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 272, no. 121657. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121657

13. Использование тонкодисперсных отсевов бетонного лома в цементных композициях для получения строительных растворов / И.И. Файзрахманов, М.И. Халиуллин, А.Н. Леклу, О. Амри // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4(38). – С. 395–401.

14. Промышленные отходы неорганической природы в строительных материалах на основе поливинилхлорида / Р.Р. Галеев, И.В. Колесникова, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов, В.Г. Хозин // Полимеры в строительстве: науч. интернет-журнал. – 2014. – Вып. 2(2). – С. 57–63.

15. Физико-механические свойства керамики на основе легкоплавкой глины, модифицированной отходами производства алюмохромового катализатора / А.Ф. Хузин, А.А. Ламберов, С.Р. Егорова, О.В. Стоянов, М.Г. Габидуллин // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 16. – С. 89–91.

16. Исследование возможности получения декоративного бетона с использованием железистого шлака / Л.Н. Ломакина, Д.А. Синицин, И.В. Недосеко, О.Н. Рахимова, Д.М. Рябых // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, №4. – С. 116–125. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.09

17. Халиуллин, М.И. Влияние дисперсности и содержания добавки керамзитовой пыли на свойства гипсоцементнопуццоланового вяжущего / М.И. Халиуллин, М.И. Нуриев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 3(37). – С. 225–230.

18. Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminatmagnesia aluminum spinel cement / R. Changzai [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 64, no. 105550. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105550
19. Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes / A. Mohamed [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18, no. e01724. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01724
20. Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review / F.G. de P. Fábio, R.T. Jacqueline, H.P.S. Lucas, K. Angela // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 285, no. 122833. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122833
21. Давидюк, А.Н. Железобетон – как фактор глобализации / А.Н. Давидюк, Ю.С. Волков // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: сб. тр. конф.* – М., 2014. – С. 279–287.
22. OpenMP: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rmnt.ru/news/45025.htm> (дата обращения: 02.11.2023).
23. Афанасьев, Г.А. Сохранение технологических и реологических свойств бетонных смесей при транспортировке, подаче и укладке в опалубочные системы / Г.А. Афанасьев // *Технологии бетонов*. – 2018. – № 5-6(142-143). – С. 32–35.
24. Изотов, В.С. Комплексная добавка для повышения эффективности гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / В.С. Изотов, Р.Х. Мухаметрахимов, А.Р. Галаутдинов // *Строительные материалы*. – 2016. – № 8. – С. 70–73.
25. Богданов, Р.Р. Исследование влияния супер- и гиперпластификаторов на основные свойства цементного теста / Р.Р. Богданов, Р.А. Ибрагимов, В.С. Изотов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 2(24). – С. 221–225.

References

1. Aleeva E.R., Agadullina A.Kh. Promyshlennyye otkhody elektrostantsii [Industrial waste from power plants]. *Obrashcheniye s otkhodami: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy*, Ufa, 2018. pp. 114-117.
2. Rakhimov R.Z. Toplivno-energeticheskiy kompleks, ekologiya i mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva [Fuel and energy complex, ecology and mineral binders]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2023, no. 3(61), pp. 67-74. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67.
3. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Kompozitsionnyye portlandtsementy s kompleksnymi mineral'nymi dobavkami kak resheniye problemy utilizatsii tekhnogennykh otkhodov promyshlennosti [Blended Portland cements with complex mineral additives as a solution of the problem man-made industrial waste utilization]. *Stroitel'nyye konstruksii, zdaniya i sooruzheniya*, 2023, no 2(3), pp. 4-10.
4. OpenMP, available at: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/rek-kol-otkhod-pred/> (accessed 2 November 2023).
5. Dzhevaga N.V., Chukhlantseva T.I. Promyshlennyye otkhody v gornodobyvayushchey otrasli: sovremennoye sostoyaniye i puti resheniya problem [Industrial waste in the mining industry: current state and ways to solve problems]. *Nauka, tekhnologii, obshchestvo: ekologicheskiy inzhiniring v interesakh ustoychivogo razvitiya territoriy*, Krasnoyarsk, 2022. pp. 210-216.
6. Abdrakhimov V.Z. The use of metallurgical calcium, aluminum and iron-containing slags in the production of heat-resistant concrete based on orthophosphoric acid. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 82-95. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07.

7. Chapaev T.M. Problema utilizatsii kar'yernykh i promyshlennykh otkhodov dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [The problem of recycling quarry and industrial waste for the production of building materials]. *Sbornik nauchnykh trudov XI vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Andrey Dmitriyevicha Sakharova*, Nal'chik, 2021. pp. 230-234.

8. Yarusova S.B., Krysenko G.F., Gordienko P.S., Balakhnin I.A. Polucheniye amorfno go dioksida kremniya iz promyshlennykh otkhodov [Obtaining amorphous silicon dioxide from industrial waste]. *Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniyem novoy produktsii*, Kirov, 2021. pp. 10-13.

9. Moskalchuk L.N., Baklay A.A., Leontyeva T.G. Ispol'zovaniye prirodno go syr'ya i promyshlennykh otkhodov dlya proizvodstva sorbentov radionuklidov [Use of natural raw materials and industrial waste for the production of radionuclide sorbents]. *Peredovyye tekhnologii i materialy budushchego*, Minsk, 2021. pp. 218-223.

10. Jinrong J., Yali F., Haoran L., Chenglong X., Zhonghua X., Ben W. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 457, no. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197.

11. Kolesnikov R.S. Promyshlennyye otkhody gornogo proizvodstva i ikh ispol'zovaniye na primere Lebedinskogo goka [Industrial waste from mining production and its use on the example of Lebedinsky mine]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchennykh BGTU im. V.G. Shukhova*, Belgorod, 2017, pp. 2611-2216.

12. Chee B.C., Leng E.T., Mahyuddin R. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 272, no. 121657. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121657.

13. Faizrakhmanov I.I., Khaliullin M.I., Leklu A.N., Amri O. Ispol'zovaniye tonkodispersnykh otsefov betonno go loma v tsementnykh kompozitsiyakh dlya polucheniya stroitel'nykh rastvorov [The use of finely dispersed screenings of concrete scrap in cement compositions for the production of building mortars]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvenno go arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2016, iss. 4(38), pp. 395-401.

14. Galeev R.R., Kolesnikova I.V., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Promyshlennyye otkhody neorganicheskoy prirody v stroitel'nykh materialakh na osnove polivinilkhlorida [Industrial waste of inorganic nature in building materials based on polyvinyl chloride]. *Polimery v stroitel'stve*, 2014, iss. 2(2), pp. 57-63.

15. Khuzin A.F., Lamberov A.A., Egorova S.R., Stoyanov O.V., Gabidullin M.G. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva keramiki na osnove legkoplavkoy gliny, modifitsirovannoy otkhodami proizvodstva alyumokhromovogo katalizatora [Physico-mechanical properties of ceramics based on low-melting clay modified by waste from the production of aluminochrome catalyst]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 89-91.

16. Lomakina L.N., Sinitsin D.A., Nedoseko I.V., Rakhimova O.N., Ryabykh D.M. Issledovaniye vozmozhnosti polucheniya dekorativno go betona s ispol'zovaniyem zhelezookisnogo shlaka [Study of the possibility of obtaining decorative concrete using iron oxide slag]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 13, pp. 116-125. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.09.

17. Khaliullin M.I., Nuriev M.I. Vliyaniye dispersnosti i sodержaniya dobavki keramzitovoy pyli na svoystva gipsotsementnoputstsolanovogo vyazhushchego [The influence of dispersion and content of expanded clay dust additive on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvenno go arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2016, no. 3(37), pp. 225-230.

18. 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 sulfoaluminatmagnesia aluminum spinel cement. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 64, no. 105550. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105550.
19. Mohamed A., Gamal M.E., Saeed M.A., Walid E.E., Hani A., Ahmed M. T. Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 18, no. e01724. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01724.
20. Fábio F.G. de P., Jacqueline R.T., Lucas H.P.S., Angela K. Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 285, no. 122833. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122833.
21. Davidyuk A.N., Volkov Yu.S. Zhelezobeton – kak faktor globalizatsii [Reinforced concrete – as a factor of globalization]. *Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushcheye*, Moscow, 2014. pp. 279-287.
22. OpenMP, available at: <https://www.rmmt.ru/news/45025.htm> (accessed 2 november 2023).
23. Afanasyev G.A. Sokhraneniye tekhnologicheskikh i reologicheskikh svoystv betonnykh smesey pri transportirovke, podache i ukladke v opalubochnyye sistemy [Preservation of technological and rheological properties of concrete mixtures during transportation, supply and placement in formwork systems]. *Tekhnologii betonov*, 2018, no. 5-6 (142-143), pp. 32-35.
24. Izotov V.S., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. Kompleksnaya dobavka dlya povysheniya effektivnosti gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego [Complex additive for increasing the efficiency of gypsum-cement-pozzolanic binder]. *Stroitel'nyye materialy*, 2016, no. 8, pp. 70-73.
25. Bogdanov R.R., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Issledovaniye vliyaniya super i giperplastifikatorov na osnovnyye svoystva tsementnogo testa [Study of the influence of super and hyperplasticizers on the basic properties of cement paste]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, no. 2(24), pp. 221-225.