

УДК 666.952.2

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN wvnuaa

DOI 10.62980/2076-0655-2025-195-204

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛ ГИДРОУДАЛЕНИЯ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ

Макаренко С.В.¹, Хозин В.Г.².

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследований, направленных на оценку возможности и эффективности применения зол гидроудаления, далее ЗГУ в качестве компонента композиционных цементных вяжущих. Исследованы и приведены в статье, структурные характеристики ЗГУ наиболее крупных ТЭЦ, расположенных в Иркутской области таких как: ТЭЦ-10, ТЭЦ-9, ТЭЦ-11, Ново-Иркутская ТЭЦ, использованы методы: рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, ИК-спектроскопия, элементный анализ, романовская спектроскопия, лазерная дифракция. В процессе проведения исследований, установлены наиболее рациональные пути получения композиционных вяжущих совместным и отдельным помолом с использованием ЗГУ и портландцемента ЦЕМ I-42,5Н, отвечающему требованиям ГОСТ 31108-2020. Определены оптимальные значения удельной поверхности, водопотребности, пуццолановой активности и коэффициента размолоспособности ЗГУ, обеспечивающие, в свою очередь, наиболее высокие показатели прочности цементного камня на композиционном вяжущем. В частности: прочность цементного камня на сжатие композиционного вяжущего, состоящего на 50% из ЗГУ, превосходит прочность цементного камня на рядовом портландцементе в возрасте 28 суток и составляет 110 МПа против 93 МПа соответственно. Достигнутые показатели прочности, полученные в результате исследований, позволяют сделать вывод об эффективности применения ЗГУ в качестве компонента композиционного цементного вяжущего и рекомендовать разработанные составы к применению, в товарных бетонах и растворах, с учетом конечных требований к итоговым показателям качества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: золы гидроудаления, композиционные вяжущие, золы ТЭЦ, совместный помол, цементный камень

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макаренко С.В., Хозин В.Г. Перспективы применения зол гидроудаления Иркутской области в качестве компонента композиционных цементных вяжущих // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т.32, № 2. – С. 195-204. DOI 10.62980/2076-0655-2025-195-204, EDN wvnuaa

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

QH MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES

EDN wvnuaa

DOI 10.62980/2076-0655-2025-195-204

PROSPECTS FOR THE USE OF ASH FROM HYDRO-REMOVAL OF THE IRKUTSK REGION AS A COMPONENT OF COMPOSITE CEMENT BINDERS

Makarenko S.V.¹, Khozin V.G.².

¹ Irkutsk National Research Technical University

² Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

ABSTRACT

The article presents the results of studies aimed at assessing the possibility and effectiveness of using hydro-removal ash, hereinafter referred to as HRA, as a component of composite cement binders. The structural characteristics of the HRA of the largest thermal power plants located in the Irkutsk region such as: TPP-10, TPP-9, TPP-11, Novo-Irkutsk TPP are studied and presented in the article; the following methods are used: X-ray structural analysis, X-ray fluorescence analysis, IR spectroscopy, elemental analysis, Romanov spectroscopy, laser diffraction. In the course of the research, the most rational ways of obtaining composite binders by combined and separate grinding using HRA and Portland cement CEM I-42.5N, which meets the requirements of GOST 31108-2020, were established. The optimal values of specific surface area, water demand, pozzolanic activity and grindability coefficient of HRA have been determined, which in turn ensure the highest strength indicators of cement stone on a composite binder. In particular: the compressive strength of cement stone of a composite binder consisting of 50% HRA exceeds the strength of cement stone on ordinary Portland cement at the age of 28 days and is 110 MPa versus 93 MPa, respectively. The achieved strength indicators obtained as a result of the research allow us to draw a conclusion about the effectiveness of using HRA as a component of composite cement binder and to recommend the developed compositions for use in commercial concretes and mortars, taking into account the final requirements for the final quality indicators.

KEY WORDS: hydro removal ash, composite binders, thermal power plant ash, combined grinding, cement stone

FOR CITATION: Makarenko S.V., Khozin V.G. Prospects for the use of ash from hydro-removal of the Irkutsk region as a component of composite cement binders // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No2. – Pp. 195 –204. DOI 10.62980/2076-0655-2025-195-204, EDN wvnuaa

ВВЕДЕНИЕ

Основным объектом исследования нашей работы являются золы гидроудаления ТЭЦ, и это не случайно! В отрасли теплоэнергетики Российской Федерации, а конкретно, в регионах, которые обеспечиваются теплом за счет сжигания твердого топлива, сложилась особо кризисная ситуация ввиду отсутствия эффективных приемов массовой переработки ранее накопленных и вновь образующихся твердотопливных отходов – чаще называемых золами ТЭЦ [1,2,3]. У остро образовавшейся проблемы есть два пути решения: первый – строительство новых золоотвалов, второй – применение эффективных технологий, позволяющих осуществить крупнотоннажную переработку [4,5].

Сдерживающими факторами первого пути решения проблемы являются: стоимость строительства новых золоотвалов, в которые необходимо будет вложиться конкретно энергетикам (по приблизительным оценкам стоимость строительства одного золоотвала составляет около 15 млрд. рублей, поскольку золоотвал является весьма простым с точки зрения производственной реализации инженерным решением).

Второй пункт сдерживания первого пути решения – законодательная база РФ и здравый смысл граждан. В частности, вывод земель из федерального фонда и их передача сектору теплоэнергетики для захоронения твердотопливных отходов противоречит всякому здравому смыслу, если принять во внимание, что на сегодняшний день в РФ под золоотвалами находится 20000 Га и в них накоплено около 1,5 млрд тонн золошлаков в целом и около 90 млн тонн в Иркутской области [6,7].

Надо отметить, что сложившаяся ситуация в отрасли не осталась без внимания Федеральных и региональных властей, в результате чего были разработаны и утверждены ряд документов, в том числе: Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла», Постановление Правительства Российской Федерации №1557-р от 15. 06. 2022 г., в котором указывается необходимость сокращения накопленных отходов от сжигания твердого топлива в два раза к 2035 г., Стратегия развития промышленности строительных материалов Российской Федерации и Иркутской области в том числе, в основе которых заложено использование техногенных отходов, Стратегия научно-технического развития Российской Федерации, а именно: «Истощение природных ресурсов», «Приоритетные направления научно-технологического развития РФ» №529 и «Перечень важнейших наукоемких технологий» №529, включающих в себя «Высокоэффективную и ресурсосберегающую энергетику», «Экологически чистые технологии эффективной добычи и глубокой переработки стратегических и дефицитных видов полезных ископаемых», а также создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками, утвержденные указом президента РФ от 18. 06. 2024 г. Выше перечисленные законодательные инициативы указывают на необходимость решения возникшей проблемы путем применения эффективных технологий переработки накопленных твердотопливных отходов [8,9,10].

Для примера реализации такого принципа решения поставленной задачи вполне логично перенять опыт дружественного нам партнера КНР. На сегодняшний день объем выхода твердотопливных отходов 600 млн. т. в год, в тоже

INTRODUCTION

The main object of our research is the ash from thermal power plants, and this is no coincidence! In the thermal power industry of the Russian Federation, and specifically in the regions that are provided with heat by burning solid fuel, a particularly critical situation has developed due to the lack of effective methods for the mass processing of previously accumulated and newly generated solid fuel waste - more often called thermal power plant ash. [1,2,3] There are two solutions to the acute problem: the first is the construction of new ash dumps, the second is the use of effective technologies that allow for large-scale processing [4,5].

The restraining factors of the first way to solve the problem are: the cost of building new ash dumps, which will require investment from power engineers (according to rough estimates, the cost of building one ash dump is about 15 billion rubles, since an ash dump is a very complex engineering solution from the point of view of industrial implementation).

The second point of restraint of the first solution is the legislative base of the Russian Federation and the common sense of citizens. In particular, the withdrawal of land from the federal fund and its transfer to the thermal power sector for the disposal of solid fuel waste contradicts all common sense, if we take into account that today in the Russian Federation there are 20,000 hectares under ash dumps and about 1.5 billion tons of ash and slag have accumulated in them in total and about 90 million tons in the Irkutsk region [6,7].

It should be noted that the current situation in the industry has not gone unnoticed by the Federal and regional authorities, as a result of which a number of documents were developed and approved, including: the Federal Project "Closed Cycle Economy", Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1557-r of 15. 06. 2022, which indicates the need to reduce accumulated waste from solid fuel combustion by half by 2035. The Strategy for the Development of the Construction Materials Industry of the Russian Federation and the Irkutsk Region, including those based on the use of man-made waste, the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation, namely: "Depletion of Natural Resources", "Priority Areas of Scientific and Technological Development of the Russian Federation" No. 529 and "List of the Most Important Science-Intensive Technologies" No. 529, including "Highly Efficient and Resource-Saving Energy", "Environmentally Friendly Technologies for the Efficient Extraction and Deep Processing of Strategic and Scarce Types of Minerals", as well as the creation of new materials with specified properties and performance characteristics, approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated June 18, 2024. The above-mentioned legislative initiatives indicate the need to solve the problem that has arisen by using effective technologies for processing accumulated solid fuel waste [8,9,10].

As an example of the implementation of such a principle for solving a given problem, it is quite logical to adopt the experience of our friendly partner, the PRC. Today, the volume of solid fuel waste output is 600 million tons per year, while the volume of disposal is 400 million tons per year, 90% of which is consumed by the building materials industry (360 million tons) [6].

время объем утилизации 400млн.тонн в год, 90% из которых потребляет промышленность строительных материалов (360 млн. т.) [6].

Учитывая все выше сказанное, нашей **целью** исследования в настоящей работе стала оценка возможности и эффективности применения зол гидроудаления наиболее крупных ТЭЦ Иркутской области в качестве компонента при разработке составов композиционных цементных вяжущих [11,12,13].

К задачам исследования относятся определение структурных характеристик исследуемых зол, установление оптимальных значений удельной поверхности, пуццолановой активности, водопотребности, коэффициента размо- лоспособности, а также принципов получения композиционных вяжущих, применяя раздельный и совместный помол с установлением оптимального значения суперпластификатора для обеспечения максимально возможных итоговых показателей прочности при сжатии цементного камня [14,15].

Материалы и методы исследования

При проведении исследований использовали золы гидроудаления Иркутской области ТЭЦ-9, ТЭЦ-10, ТЭЦ-11 и Ново-Иркутской ТЭЦ. В качестве клинкерного компонента при разработке составов композиционных цементных вяжущих применяли портландцемент ЦЕМІ-42,5Н, отвечающего требованиям ГОСТ 31108-2020. В качестве пластифицирующих добавок использовали суперпластификаторы на основе поликарбоксилатов, такие как Tolstoplast ST-1, sika VC 225, PC5300. Tolstoplast ST-1 и sika VC 225 использовались в сухом виде, PC5300 в виде 50% водного концентрата.

Разработка составов композиционных вяжущих сводилась к оценке эффективности их получения методом совместного или раздельного помола входящих в состав компонентов в присутствии суперпластификатора и при его введении с водой затворения, а также оценке эффективности вариаций между удельной поверхностью золы гидроудаления и портландцемента при проведении раздельного помола.

Химический состав зол гидроудаления оценивали с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 Pioneer. Фазовый состав ЗГУ оценивали методом рентгеноструктурного анализа на приборе Shimadzu XRD-7000 (таблица 1 и 2 соответственно). Процентное содержание углерода в составе ЗГУ оценивали с помощью элементного анализа CHN на приборе CHNS-анализаторе Euro EA 3000. Состояние углерода, содержащегося в ЗГУ, оценивали методом романовской спектроскопии на приборе LabRAM HR evolution, природу взаимодействие поликарбоксилатов с поверхностью ЗГУ оценивали методом ИК-спектроскопии на приборе ФТ-80, оснащенный приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Оценку изменения размеров частиц оценивали методом лазерной дифракции на приборе FRITISCH ANALYSETTE 22. Удельную поверхность компонентов измеряли при помощи прибора Ходакова ПСХ-12. Пуццолановую активность ЗГУ определяли по ГОСТ Р 59536-2021. Нормальную плотность теста из ЗГУ и цементного теста по ГОСТ 310.3-76.

Для изготовления образцов использовали тесто нормальной плотности композиционного вяжущего с последующей формовкой образцов кубов 2×2×2 см, далее

Taking into account all of the above, our **research objective** in this paper was to assess the possibility and effectiveness of using ash from hydraulic removal of the largest thermal power plants in the Irkutsk region as a component in the development of composite cement binders [11,12,13].

The objectives of the study include determining the structural characteristics of the studied ashes, establishing the optimal values of specific surface area, pozzolanic activity, water demand, grindability coefficient, as well as principles for obtaining composite binders using separate and combined grinding with the establishment of the optimal value of the superplasticizer to ensure the highest possible final indicators of compressive strength of cement stone [14,15].

Materials and methods of research

The research was conducted using ash from hydraulic removal from the Irkutsk region CHPP-9, CHPP-10, CHPP-11 and Novo-Irkutsk CHPP. Portland cement CEMI-42.5N, which meets the requirements of GOST 31108-2020, was used as a clinker component in the development of composite cement binders. Superplasticizers based on polycarboxylates, such as Tolstoplast ST-1, sika VC 225, PC5300, were used as plasticizing additives. Tolstoplast ST-1 and sika VC 225 were used in dry form, PC5300 in the form of a 50% aqueous concentrate.

The development of compositions of composite binders was reduced to an assessment of the efficiency of their production by the method of joint or separate grinding of the constituent components in the presence of a superplasticizer and when it is introduced with mixing water, as well as an assessment of the efficiency of variations between the specific surface area of hydro-removal ash and Portland cement when separate grinding is carried out.

The chemical composition of hydro-removal ash was assessed using an S4 Pioneer X-ray fluorescence spectrometer. The phase composition of the HRA was assessed by X-ray structural analysis on a Shimadzu XRD-7000 device (Table 1 and Table 2, respectively). The percentage content of carbon in the HRA was assessed using CHN elemental analysis on a Euro EA 3000 CHNS analyzer. The state of carbon contained in the HRA was assessed by Romanov spectroscopy on a LabRAM HR evolution device. The nature of the interaction of polycarboxylates with the HRA surface was assessed by IR spectroscopy on an FT-80 device equipped with an attenuated total internal reflection attachment. The change in particle size was assessed by laser diffraction on a FRITISCH ANALYSETTE 22 device. The specific surface area of the components was measured using a Khodakov PSKh-12 device. The pozzolanic activity of the HRA was determined according to GOST R 59536-2021. Normal density of dough from HRA and cement dough according to GOST 310.3-76.

To prepare the samples, a normal-density composite binder dough was used, followed by molding of 2x2x2 cm cube samples, then the samples were kept under normal conditions and subjected to compression testing at the age of 1, 7, 28 days.

образцы выдерживались в нормальных условиях и подвергались испытанию на сжатие в возрасте 1, 7, 28 суток.

Эксперименты и обсуждение результатов

По результатам рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного анализа установлен химический и фазовый состав исследуемых ЗГУ (табл.1 и 2). Данные указывают на схожесть химического и фазового состава исследуемых ЗГУ и позволяют их отнести по показателю M_o (модуль основности) к ультракислым золам, состоящим в значительной степени из стеклофазы от 62 до 69%.

Experiments and discussion of results

Based on the results of X-ray fluorescence and X-ray structural analysis, the chemical and phase composition of the studied HRA was established (tables 1 and 2). The data indicate the similarity of the chemical and phase composition of the studied HRA and allow them to be classified according to the M_o (basicity modulus) indicator as ultra-acidic ashes, consisting largely of a glass phase from 62 to 69%.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДУЕМЫХ ЗОЛ ГИДРОУДАЛЕНИЯ
Table 1. Chemical composition of the studied hydraulic removal ashes

Наименование ЗГУ Name of HRA	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	M _o	M _a
ТЭЦ-9 TRP-9	0,11	1,33	23,19	59,07	0,108	0,721	6,372	10,174	0,09	0,39
ТЭЦ-10 TRP-10	0,22	1,68	25,19	58,01	0,341	0,78	4,823	6,642	0,08	0,43
ТЭЦ-11 TRP-11	0,16	0,944	28,76	54,83	0,655	0,717	4,981	9,81	0,07	0,52
Ново-Иркутская ТЭЦ Novo-Irkutsk Thermal Power Plant	<0,2	1,516	24,75	57,37	2,56	0,745	6,471	7,14	0,09	0,43

ТАБЛИЦА 2. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЗГУ
Table 2. PHASE COMPOSITION OF HRA

Наименование ЗГУ Name of HRA	Процентное содержание, % Percentage content, %							
	Аморфная фаза The amorphous phase	Кристаллическая фаза The crystalline phase	Кварц Quartz	Кальцит Calcite	Муллит Mullite	Гематит Hematite	Магнетит Magnetite	Альбит Albite
ТЭЦ-11 TRP-11	69,4	30,6	23,7	---	---	2,5	4,4	---
ТЭЦ-9 TRP-9	64,7	35,3	7,2	0,4	27,7	---	---	---
ТЭЦ-10 TRP-10	62,2	37,8	20,3	---	12,6	0,4	0,6	4
Ново-Иркутская ТЭЦ Novo-Irkutsk Thermal Power Plant	63	37	24,6	0,8	7,7	3,1	0,8-	---

В процессе проведения исследований, установлена пуццолановая активность ЗГУ и ее изменение в зависимости от удельной поверхности (рис.1). Наиболее высокое значение пуццолановой активности, в рамках проведенных исследований, получено при удельной поверхности ЗГУ $S_{уд} = 6000 \text{ см}^2/\text{г}$. В свою очередь, наибольшую пуццолановую активность показала ЗГУ Ново-Иркутской ТЭЦ – 75 мг/г.

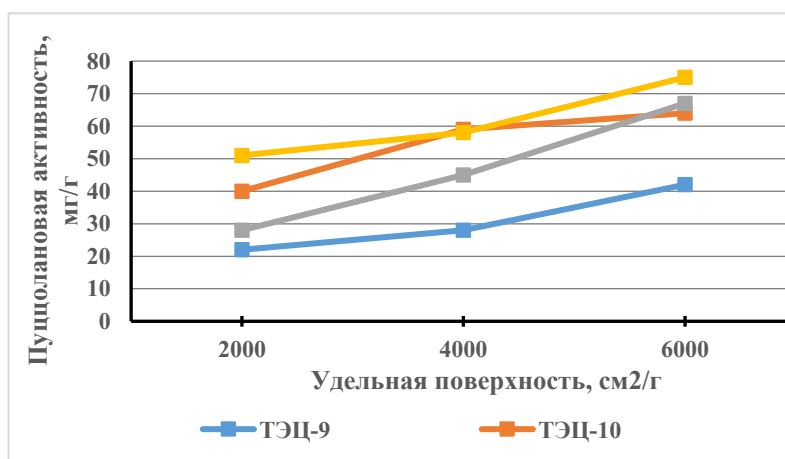
During the research, the pozzolanic activity of HRA and its change depending on the specific surface area were established (Fig. 1). The highest value of pozzolanic activity, within the framework of the conducted studies, was obtained with a specific surface area of HRA $S_{sp} = 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$. In turn, the highest pozzolanic activity was demonstrated by the HRA of the Novo-Irkutsk Thermal Power Plant – 75 mg/g.

РИСУНОК 1

ИЗМЕНЕНИЕ ПУЦЦОЛАНОВОЙ АКТИВНОСТИ ЗГУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Figure 1

Change in pozzolanic activity of HRA depending on its specific surface area



Снижение водопотребности ЗГУ (рис.2) при увеличении ее удельной поверхности, по нашему мнению, связано со снижением пористости в процессе измельчения и увеличением содержания углерода на вновь образованной поверхности частиц ЗГУ путем механического его нанесения в процессе измельчения.

Увеличение процентного содержания углерода на поверхности частиц ЗГУ в процессе измельчения (рис.3) связано с эффектом капсуляции, в частности, присутствием частиц, в которых частицы меньшего размера заключены в частицы большего размера «принцип русской матрешки» (рис.4). Поскольку капсулирование препятствует интенсивному окислению углерода в процессе сжигания угля в топках котлов, частично углерод находится в условиях препятствующим его окислению и увеличивает свое содержание при измельчении на поверхности частиц ЗГУ (рис.5), что в том числе отчетливо видно по изменению цвета ЗГУ, их чернение с увеличением удельной поверхности.

При проведении следующего этапа исследований, посвященного разработке составов композиционных вяжущих, было решено использовать в качестве основного компонента вяжущего ЗГУ Ново-Иркутской ТЭЦ, основываясь на наиболее высокой пуццолановой активности.

The decrease in the water demand of HRA (Fig. 2) with an increase in its specific surface area, in our opinion, is associated with a decrease in porosity during the grinding process and an increase in the carbon content on the newly formed surface of HRA particles by its mechanical application during the grinding process.

The increase in the percentage of carbon on the surface of the HRA particles during the grinding process (Fig. 3) is due to the encapsulation effect, in particular, the presence of particles in which smaller particles are enclosed in larger particles, the “Russian Matryoshka principle” (Fig. 4). Since encapsulation prevents intensive oxidation of carbon during the combustion of coal in boiler furnaces, some of the carbon is in conditions that prevent its oxidation and increases its content when crushed on the surface of the HRA particles (Fig. 5), which is also clearly visible by the change in the color of the HRA, their blackening with an increase in the specific surface.

During the next stage of research devoted to the development of compositions of composite binders, it was decided to use HRA Novo-Irkutsk TPP as the main component of the binder, based on its highest pozzolanic activity.

РИСУНОК 2

ИЗМЕНЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ ГУСТОТЫ ТЕСТА ЗГУ НОВО-ИРКУТСКОЙ ТЭЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Figure 2

Change in the normal density of the HRA test of the Novo-Irkutsk TPP depending on its specific surface



РИСУНОК 3

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ЗГУ,
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ

Figure 3

Carbon content in HRA, depending on its specific surface area



РИСУНОК 4

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЧАСТИЦ ЗГУ
В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Figure 4

Change in the shape of HRA particles during grinding

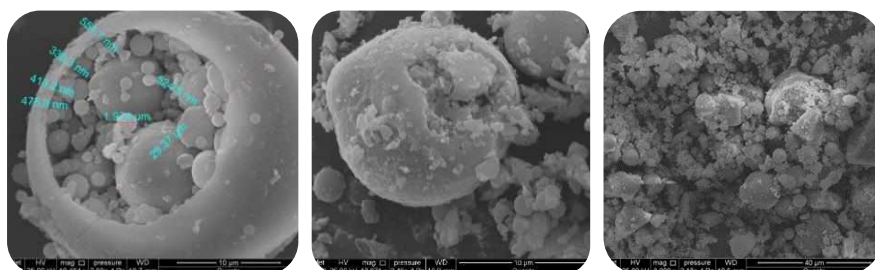
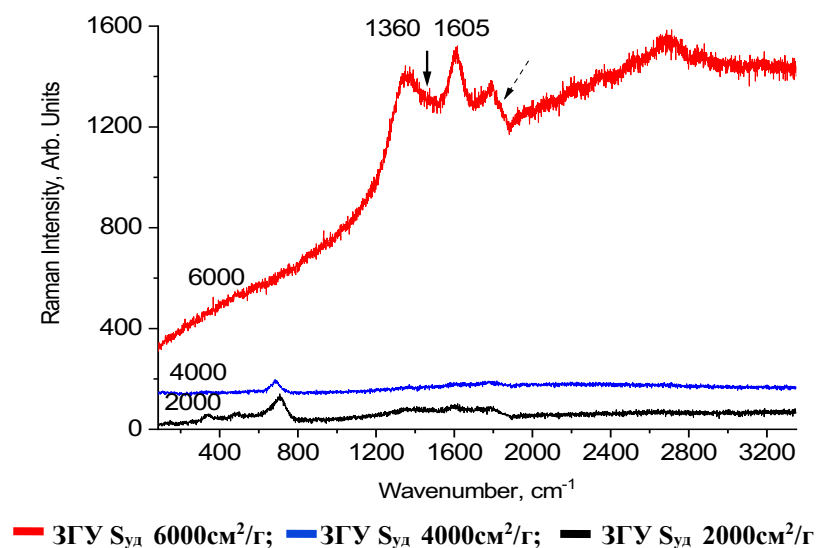


РИСУНОК 5

ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ
УГЛЕРОДА В СОСТАВЕ ЗГУ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Figure 5

Elemental analysis of carbon content in the composition of HRA depending on its specific surface area



На первом этапе оценивали кинетику изменения удельной поверхности и коэффициент размолоспособности ЗГУ в присутствии суперпластификатора и без суперпластификатора (рис.6 и 7). Оценивая кинетику измельчения ЗГУ, нами не выявлено существенных различий в численном значении коэффициента размолоспособности и скорости приращения удельной поверхности ЗГУ. Исходя из вышесказанного, было принято решение производить помол компонентов в присутствии суперпластификатора, поскольку этот прием упрощает технологический процесс без снижения физико-механических свойств исследуемых материалов.

Далее, проводили оценку водопотребности ЗГУ в зависимости от ее удельной поверхности, вида и процентного содержания суперпластификатора и способа его введения (табл.3).

At the first stage, the kinetics of changes in the specific surface area and the grindability coefficient of the ZGU were assessed in the presence of a superplasticizer and without a superplasticizer (Figs. 6 and 7). When evaluating the kinetics of grinding of HRA, we did not find any significant differences in the numerical value of the grindability coefficient and the rate of increase in the specific surface area of HRA. Based on the above, it was decided to grind the components in the presence of a superplasticizer, since this technique simplifies the technological process without reducing the physical and mechanical properties of the materials being studied.

Next, an assessment was made of the water requirement of the HRA depending on its specific surface area, the type and percentage content of the superplasticizer and the method of its introduction (Table 3).

РИСУНОК 6

КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗГУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Figure 6

Kinetics of change in specific surface area of HRA depending on its grinding conditions

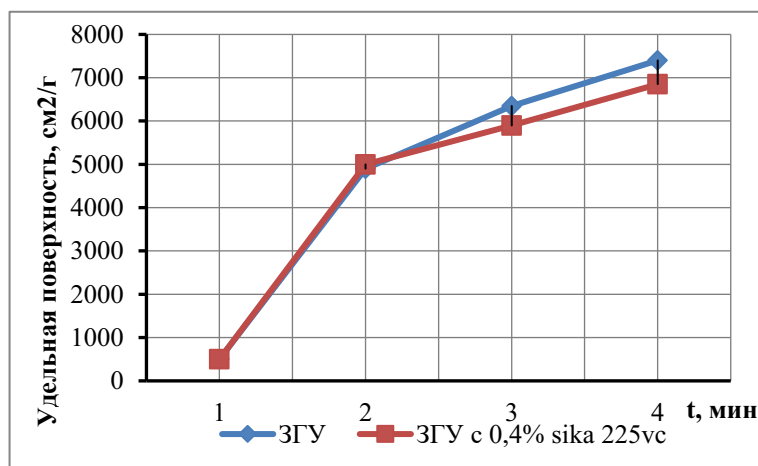


РИСУНОК 7

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ ЗГУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Figure 7

Change in the grindability coefficient of HRA depending on the conditions of its grinding

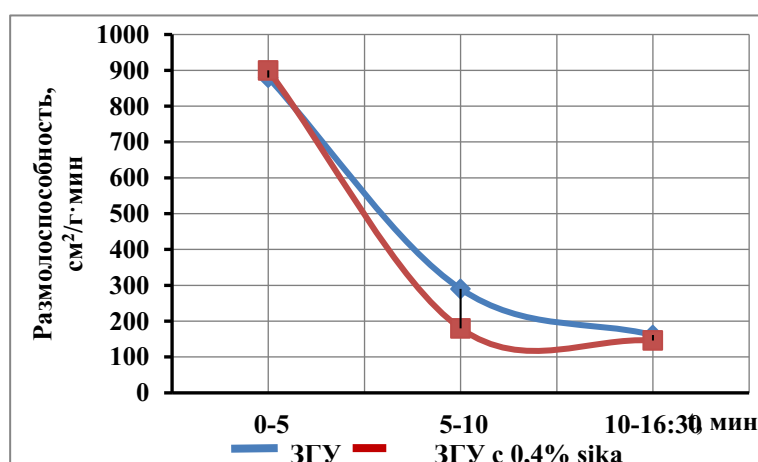

 ТАБЛИЦА 4. НОРМАЛЬНАЯ ГУСТОТА ТЕСТА ЗГУ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ $S_{уд}$, СОДЕРЖАНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА, ЕГО ВИДА И СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ

 TABLE 4. Normal density of HRA dough, depending on its S_{sa} , content of superplasticizer, its type and method of introduction

Наименование Sample name	Удельная поверхность, см²/г Specific surface area, cm²/g	Нормальная плотность, % Normal density, %
ЗГУ+Tolstoplast 0,2%	6100	37
ЗГУ+Tolstoplast 0,4%	5850	28
ЗГУ+Tolstoplast 0,6%	6900	27,5
ЗГУ+Tolstoplast 0,6%	6200	29
ЗГУ+PC 5300ж 0,4%	5600	37
ЗГУ+PC 7200ж 0,8%	5750	34
ЗГУ+sika VC 225 0,2%	5750	35,5
ЗГУ+sika VC 225 0,4%	6850	37
ЗГУ+sika VC 225 0,4% с водой затворения	7400	35
ЗГУ+sika VC 225 0,4% с водой затворения	5750	27

Заключительный этап исследования состоял в оценке эффективности способа получения композиционных вяжущих путем совместного или раздельного помола с использованием равнозначных и неравнозначных значений удельной поверхности ЗГУ и портландцемента, входящих в состав композиционных вяжущих. Основным показателем эффективности являлась прочность на сжатие цементного камня в возрасте 1, 7 и 28 суток нормального твердения (табл.4).

The final stage of the study consisted of assessing the efficiency of the method for obtaining composite binders by combined or separate grinding using equivalent and unequal values of the specific surface area of the HRA and Portland cement included in the composition of the composite binders. The main indicator of efficiency was the compressive strength of cement stone at the age of 1, 7 and 28 days of normal hardening. (Table 4).

При проведении испытаний удельная поверхность ЗГУ и портландцемента отличалась от значений, приведенных в таблице на величину +/- 200 см²/г.

Испытания проводились на образцах-кубах 2×2×2 см при водотвердом соотношении 0,3. Пластификатор (Tolstoplast ST-1) вводится при помоле. Содержание его составило 0,4% от массы сухих компонентов.

During the tests, the specific surface area of ZGU and Portland cement differed from the values given in the table by +/- 200 cm²/g.

The tests were carried out on 2x2x2 cm cube samples with a water-solid ratio of 0.3. The plasticizer (Tolstoplast ST-1) is introduced during milling. Its content was 0.4% of the mass of dry components.

ТАБЛИЦА 4. ПРОЧНОСТЬ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА И КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СОСТАВА
Table 4. The strength of Portland cement and composite binders depending on specific surface area and composition

Маркировка вяжущего* Binder marking	S _{уд} цемента, см ² /г / S _{уд} ЗГУ, см ² /г** S _{sa} cement, cm ² /g / S _{sa} HRA cm ² /g	R средн, МПа R average, MPa	Возраст, сут. Time, days
КВ50	$\frac{4500}{7000}$	18,5	1
		53,2	7
		119,7	28
КВ-30	$\frac{4500}{7000}$	9,7	1
		22,9	7
		49	28
КВ-70	$\frac{4500}{7000}$	31,5	1
		86,8	7
		147,8	28
КВ-30	$\frac{7000}{4500}$	5,2	1
		18,7	7
		32,2	28
КВ-70	$\frac{7000}{4500}$	15,3	1
		51,3	7
		76,8	28
ЦЕМІ-42,5	7000	21,2	1
		56,3	7
		84,2	28
КВ-50	$\frac{7000}{4500}$	12,9	1
		21,7	7
		67,8	28
ЦЕМІ-42,5	3200	15,6	1
		67,2	7
		92,3	28

* Численный индекс в маркировке вяжущего указывает на содержание цемента в его составе
** в числителе значение удельной поверхности цемента, в знаменателе ЗГУ

* The numerical index in the binder marking indicates the cement content in its composition
** the numerator contains the value of the specific surface area of cement, the denominator contains HRA

Заклучение

При проведении фундаментальных исследований, направленных на оценку структурных особенностей ЗГУ, установлена их схожесть как по химическому, так и минералогическому составу. Учитывая модуль основности исследуемых зол и его близкие значения, вполне обоснован прогноз о причислении ЗГУ к ультракислым золам, эффективность использования которых в качестве компонента в композиционных вяжущих сводится к микронаполнению и проявлению пуццолановой активности. Установлено максимальное значение пуццолановой активности ЗГУ в рамках исследований, которое достигается при обеспечении соответствующего значения удельной поверхности S_{уд} = 6000 см²/г. Дальнейшее развитие удельной поверхности вносит дополнительные экономические затраты, связанные с ухудшением размолоспособности частиц. В свою очередь, оптимальное значение водопотребности ЗГУ в данном случае соответствует оптимальному значению выше приведённой удельной поверхности

Conclusions

During fundamental research aimed at assessing the structural features of HRA, their similarity in both chemical and mineralogical composition was established. Taking into account the basicity modulus of the studied ashes and its close values, the prediction about classifying HRA as ultra-acid ashes, the efficiency of using which as a component in composite binders comes down to microfilling and the manifestation of pozzolanic activity, is fully justified. The maximum value of pozzolanic activity of HRA was established within the framework of the studies, which is achieved by ensuring the corresponding value of the specific surface S_{sa} = 6000 cm²/g. Further development of the specific surface area introduces additional economic costs associated with the deterioration of the grindability of the particles. In turn, the optimal value of water demand of the HRA in this case corresponds to the optimal value of the above-mentioned specific surface of the HRA. During the implementation of the next stage of research, the role of carbon contained in the composition of the

ЗГУ. При реализации следующего этапа исследований установлена роль углерода, содержащегося в составе ЗГУ, которая сведена к снижению водопотребности ЗГУ ввиду частичной гидрофобизации частиц в процессе проведения помола путем механического его нанесения на поверхность. Следует также отметить, что в результате исследований негативного вклада в формирование структуры, руководствуясь значением прочности на сжатие цементного камня, отмечено не было. Установлено оптимальное значение суперпластификатора и его влияние при проведении помола ЗГУ. Оптимальное значение суперпластификатора на основе поликарбоксилатов, обеспечивающего минимальную водопотребность ЗГУ, находится в диапазоне 0,4-0,6% в пересчете на сухое вещество от массы ЗГУ. Оценивая кинетику измельчения ЗГУ, нами не выявлено существенных различий в численном значении коэффициента размолоспособности и скорости приращения удельной поверхности ЗГУ. Исходя из вышесказанного, было принято решение производить помол компонентов в присутствии суперпластификатора, поскольку этот прием упрощает технологический процесс без снижения физико-механических свойств исследуемых материалов.

При разработке составов композиционных вяжущих, в частности установления эффективности применения раздельного или совместного помола компонентов, можно сделать следующие выводы:

1. Раздельный помол компонентов, в данном случае, наиболее предпочтителен, поскольку появляется возможность варьировать соотношением компонентов в составе композиционного вяжущего, их удельной поверхностью и, соответственно, оказывать направленное воздействие на итоговые физико-механические свойства композиционных вяжущих.
2. Наиболее высокие показатели прочности достигаются при большем значении удельной поверхности ЗГУ по отношению портландцемента, судя по всему, это связано с качественным изменением итогового фазового состава цементного камня, в частности снижением процентного содержания гидроксида кальция и увеличенным содержанием низкоосновных новообразований.
3. Увеличение удельной поверхности цементного камня до $S_{уд} = 7000 \text{ см}^2/\text{г}$ в значительной степени снижает прочность как чистого цементного камня, так и цементного камня на композиционном вяжущем.
4. Вполне обоснована эффективность применения зол гидроудаления в композиционных вяжущих, поскольку достигнут значимый эффект при их введении как с позиции физико-механических характеристик (прочность на сжатия цементного камня KB50 превосходит прочность цементного камня на ЦЕМІ-42,5), так и с позиции экономической эффективности, поскольку для производителей снижение расхода цемента до 50% без снижения качества продукции весьма значимо.
5. В завершении необходимо отметить, что проведенные исследования указывают на возможность и эффективность использования накопленных зол гидроудаления при производстве композиционных цементных вяжущих и материалов на их основе и могут служить одним из путей их утилизации

HRA was established, which was reduced to a decrease in the water demand of the HRA due to the partial hydrophobization of particles during the grinding process by mechanically applying it to the surface. It should also be noted that as a result of the studies, no negative contribution to the formation of the structure, guided by the value of the compressive strength of the cement stone, was noted. The optimal value of the superplasticizer and its influence during the grinding of HRA have been established. The optimal value of the polycarboxylate-based superplasticizer, which ensures the minimum water requirement of the HRA, is in the range of 0.4-0.6% in terms of dry matter from the mass of the HRA. When evaluating the kinetics of grinding of HRA, we did not find any significant differences in the numerical value of the grindability coefficient and the rate of increase in the specific surface area of HRA. Based on the above, it was decided to grind the components in the presence of a superplasticizer, since this technique simplifies the technological process without reducing the physical and mechanical properties of the materials being studied.

When developing compositions of composite binders, in particular establishing the efficiency of using separate or combined grinding of components, the following conclusions can be made:

1. Separate grinding of components, in this case, is most preferable, since it becomes possible to vary the ratio of components in the composition of the composite binder, their specific surface area and, accordingly, to have a targeted effect on the final physical and mechanical properties of composite binders.
2. The highest strength indicators are achieved with a higher value of the specific surface area of the cement stone relative to Portland cement; apparently, this is due to a qualitative change in the final phase composition of the cement stone, in particular a decrease in the percentage content of calcium hydroxide and an increased content of low-basic neoplasms.
3. Increasing the specific surface area of cement stone to $S_{sp} = 7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ significantly reduces the strength of both pure cement stone and cement stone on a composite binder.
4. The efficiency of using hydraulic ash in composite binders is fully justified, since a significant effect has been achieved with their introduction both from the standpoint of physical and mechanical characteristics (the compressive strength of KV50 cement stone exceeds the strength of CEMI-42.5 cement stone) and from the standpoint of economic efficiency, since for manufacturers a reduction in cement consumption of up to 50% without reducing product quality is very significant.

5. In conclusion, it should be noted that the conducted studies indicate the possibility and effectiveness of using accumulated hydro-removal ash in the production of composite cement binders and materials based on them and can serve as one of the ways of their utilization.

Литература:

1. Щербakov E. Золошлаковая революция [Электронный ресурс] // *Сибирский энергетик*. 2015. Т. 444, № 33. URL: <http://www.vsp.ru/2015/09/04/zoloshlakovaya-revolutsiya-2>.
2. Михайлов Ю.В. Новые технологии недропользования, обеспечивающие экологическую и национальную безопасность России // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 11. С. 92–106. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-92-106.
3. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев, А.И. Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Mag. Civ. Eng.* 2011. № 4. С. 16–21.
4. Пичугин Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций // *Проблемы региональной экологии*. - 2019. - №4. - С. 77-87.
5. Heidrich, C. Coal combustions products: a global perspective/ C. Heidrich, H.J. Feuerborn, A. Weir // *World of coal ash conference*. - 2013. - С. 22-23.
6. <https://arvis.online/> (дата обращения 02. 02. 2025 г.)
7. <http://komitet-energo.duma.gov.ru/novosti/391c8a7c-2c3e-4037-ae22-a0ac9cae562b> (дата обращения 02. 02. 2025 г.)
8. Брюхань Ф.Ф. Использование золошлаковых отходов угольных тепловых электростанций для производства строительных материалов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сб. докл. I Национальной конф. (Москва, 30 сентября 2020 г.). М.: НИУ МГСУ, 2020. С. 225-228.
9. Гаппаров Б.Н., Облокулова С.А. Новые виды строительных материалов: современное состояние, существующий научный потенциал и планы на будущее // *Экономика и социум*. 2023. № 4 (107)–1. С. 508-510.
10. Haleem A., Luthra S., Mannan B. et al. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // *Resources Policy*. 2016. Vol. 49. Pp. 334-348. DOI: [10.1016/j.resourpol.2016.07.002](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).
11. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 77–83.
12. Da Silva S.R., Jairo José de Oliveira Andrade. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete // *Sustain*. 2022. Т. 14. № 11.
13. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete // *SN Applied Sciences*. 2020. Т. 2. №. 6. - pp. 1-9. EDN: [OCJXGQ](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).
14. Явинский А.В., Чулкова И.Л. Влияние удельной поверхности золы гидроудаления на свойства золоцементного камня // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 2. С. 73-80. DOI: [10.33622/0869-7019.2023.02.73-80](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.02.73-80).
15. Явинский А.В., Чулкова И.Л. Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20. № 1 (89). С. 158-166. DOI: [10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166)

References:

1. Shcherbakov E. Ash and slag revolution [Electronic resource] // *Siberian power engineer*. 2015. Vol. 444, No. 33. URL: <http://www.vsp.ru/2015/09/04/zoloshlakovaya-revolutsiya-2>.
2. Mikhailov Yu.V. New technologies of subsoil use, ensuring environmental and national security of Russia // *Mining information and analytical bulletin*. 2018. No. 11. P. 92–106. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-92-106.
3. Vatin N.I., Petrovsov D.V., Kalachev, A.I. Lakhtinen P. Use of ashes and ash and slag waste in construction // *Mag. Civ. Eng.* 2011. No. 4. P. 16–21.
4. Pichugin E. A. Analytical review of the accumulated experience in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in economic circulation // *Problems of regional ecology*. - 2019. - No. 4. - P. 77-87.
5. Heidrich, C. Coal combustions products: a global perspective/ C. Heidrich, H.J. Feuerborn, A. Weir // *World of coal ash conference*. - 2013. - С. 22-23.
6. <https://arvis.online/> (access date 02. 02. 2025)
7. <http://komitet-energo.duma.gov.ru/novosti/391c8a7c-2c3e-4037-ae22-a0ac9cae562b> (access date 02. 02. 2025)г.)
8. Bryukhan F.F. Use of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants for the production of building materials // *Actual problems of the construction industry and education: Coll. reports of the 1st National Conf. (Moscow, September 30, 2020)*. Moscow: National Research University Moscow State University of Civil Engineering, 2020. Pp. 225-228.
9. Gapparov B.N., Oblokulova S.A. New types of building materials: current state, existing scientific potential and plans for the future // *Economy and Society*. 2023. No. 4 (107)–1. Pp. 508-510.
10. Haleem A., Luthra S., Mannan B. et al. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // *Resources Policy*. 2016. Vol. 49. Pp. 334-348. DOI: [10.1016/j.resourpol.2016.07.002](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).
11. Markov A.Yu., Strokovva V.V., Markova I.Yu. Evaluation of the properties of fuel ash as components of composite materials // *Construction materials*. 2019. No. 4. P. 77–83.
12. Da Silva S.R., Jairo José de Oliveira Andrade. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete // *Sustain*. 2022. Т. 14. № 11.
13. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete // *SN Applied Sciences*. 2020. Т. 2. №. 6. - pp. 1-9. EDN: [OCJXGQ](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).
14. Yavinsky A.V., Chulkova I.L. Effect of the specific surface area of hydraulic ash on the properties of ash-cement stone // *Industrial and civil engineering*. 2023. No. 2. P. 73-80. DOI: [10.33622/0869-7019.2023.02.73-80](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.02.73-80).
15. Yavinsky A.V., Chulkova I.L. Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2023. Vol. 20. No. 1 (89). P. 158-166. DOI: [10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166)

Макаренко Сергей Викторович – доцент, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

E-mail: makarenko_83_07@mail.ru (автор для связи)

Хозин Вадим Григорьевич – заведующий кафедрой ТСМИК, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КГАСУ), *E-mail:* khozin.vadim@yandex.ru

Вклад авторов написание статьи равнозначный.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Makarenko Sergey Viktorovich – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Irkutsk National Research Technical University. *E-mail:* makarenko_83_07@mail.ru (author for contact)

Khozin Vadim Grigorievich – head of the department of TSMIC, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering (KGASU), *E-mail:* khozin.vadim@yandex.ru

The authors contribution to the writing of the article is equal.

The authors declare that there is no conflict of interest.