



## Оценка влияния технологических факторов на свойства строительной керамики на основе золошлаковых смесей ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго»

С.В. Макаренко<sup>1</sup>, А.Б. Гонжитов<sup>1</sup>, О.В. Хохряков<sup>2</sup>, В.Г. Хозин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия Федерация

<sup>2</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Общее накопление отходов золошлаковых смесей сегодня в Российской Федерации достигает порядка 1,5 миллиардов тонн. При этом утилизируется или применяется в различных отраслях промышленности всего 1,5-2,1 миллионов тонн годовых выбросов. Очевидно, что в ближайшие годы возникнет опасность масштабного загрязнения окружающей среды, переполнения золошлакоотвалов, ограничения мощности угольных генераций и, вероятно, вывода их из энергетического баланса. В связи с этим целью работы явилась оценка эффективности золошлаковых смесей теплоэлектростанций для производства изделий строительной керамики. К задачам исследования относятся изучение свойств этих смесей и установление влияния технологических факторов на прочность образца-сырца зольной керамики в процессе сушки при традиционном способе производства методом полусухого прессования.

*Результаты.* С помощью регрессионного анализа получены математические уравнения сырьевой прочности образцов на основе золошлаковых смесей как до, так и после сушки в зависимости от таких технологических факторов, как давление прессования, формовочная влажность и удельная поверхность. Представлены результаты определения основных физико-механических показателей образцов зольной керамики после обжига: плотность, прочность при сжатии и водопоглощение.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в разработке составов строительной керамики на основе таких крупнотоннажных отходов, как золошлаковые смеси без изменения способа её изготовления методом полусухого прессования. По технологическим и физико-механическим показателям они удовлетворяют современным нормативным документам и могут быть рекомендованы для широкого применения в производстве керамических изделий строительного назначения.

**Ключевые слова:** золошлаковые смеси, строительная керамика, полусухое прессование, сырьевая прочность, регрессионный анализ

**Для цитирования:** Макаренко С.В., Гонжитов А.Б., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Оценка влияния технологических факторов на свойства строительной керамики на основе золошлаковых смесей ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 233-240, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_233, EDN: NGAEYB

# Assessment of the influence of technological factors on the properties of building ceramics based on ash and slag mixtures at the thermal power plant of «Irkutskenergo»

S.V. Makarenko<sup>1</sup>, A.B. Gonzhitov<sup>1</sup>, O.V. Khokhryakov<sup>2</sup>, V.G. Khozin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The total accumulation of waste ash and slag mixtures today in the Russian Federation reaches about 1,5 billion tons. At the same time, only 1,5-2,1 million tons of annual emissions are recycled or used in various industries. It is obvious that in the coming years there will be a danger of large-scale environmental pollution, overfilling of ash and slag dumps, limiting the capacity of coal-fired generation and, probably, their removal from the energy balance. In this regard, the purpose of the work was to assess the effectiveness of ash and slag mixtures from thermal power plants for the production of building ceramics products. The objectives of the research include studying the properties of these mixtures and establishing the influence of technological factors on the strength of a raw ash ceramic sample during the drying process using the traditional production method of semi-dry pressing.

*Results.* Using regression analysis, mathematical equations were obtained for the raw strength of samples based on ash and slag mixtures both before and after drying, depending on such technological factors as pressing pressure, molding humidity and specific surface area. The results of the main physical and mechanical parameters of ash ceramic samples after firing are presented: density, compressive strength and water absorption.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the development of construction ceramic compositions based on such large-scale waste as ash and slag mixtures without changing the method of its production by semi-dry pressing. In terms of technological and physical-mechanical indicators, they meet modern regulatory documents and can be recommended for wide use in the production of ceramic products for construction purposes.

**Keywords:** ash and slag mixtures, building ceramics, semi-dry pressing, raw strength, regression analysis

**For citation:** Makarenko S. V., Gonzhitov A. B., Khokhryakov O. V., Khozin V. G. Assessment of the influence of technological factors on the properties of building ceramics based on ash and slag mixtures at the thermal power plant of «Irkutskenergo» // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 233-240, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_233, EDN: NGAEYB

## 1. Введение

На сегодняшний день утилизация твердотопливных отходов, таких как золошлаковые смеси (ЗШС), является весьма приоритетной задачей, как для Иркутской области [1], так и для многих регионов РФ в целом [2-3]. Она согласуется с национальной концепцией защиты окружающей среды, отраженной в законодательных документах, принятых государственными органами различного уровня и отраслевой принадлежности:

1. Постановление правительства Российской Федерации № 1557-р от 15.06.2022 г., в котором указывается необходимость сокращения накопленных отходов от сжигания твердого топлива к 2035 году в два раза;

2. Стратегия развития промышленности строительных материалов Российской Федерации и Иркутской области, в том числе, изложенной в распоряжение Правительства РФ № 868-р от 10.05.2016 г. В нём предусматривается расширение способов утилизации техногенных отходов;

3. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, отраженная в указе Президента РФ от 01.12.2016 № 642 (ред. от 15.03.2021). Одним из приоритетных вызовов является влияние антропогенных нагрузок, угрожающих истощению природных ресурсов.

Принятые документы разработаны неслучайно, поскольку сегодня на территории Российской Федерации функционируют 172 ТЭЦ на твердом топливе, в результате сжигания которого накоплено свыше 1,5 млрд. т отходов золы и шлаков [4-7]. В одной только Иркутской области их количество превысило 90 млн. т. По данным ЗАО «АПБЭ» площадь золошлакоотвалов достигает 28 тыс. га. При этом доля утилизируемых отходов по отношению к ежегодным выбросам не превышает 10 %.

Очевидно, что прогнозируемый объем снижения твердотопливных отходов совершенно нереален, на что указывает ряд факторов. Во-первых [8], большинство функционирующих ТЭЦ имеют высокий объем мощностей по выработке тепловой энергии. Количество угольных бассейнов в РФ общим объемом около 400 млрд. т составляет 22, а ежегодная добыча ископаемого топлива не превышает 202 млн.т. Во-вторых, перевод ТЭЦ на альтернативный вид топлива, например природный газ, зачастую экономически нецелесообразен, поскольку ряд российских регионов не газифицирован. В-третьих, на тепловую энергию ежегодно возрастает спрос, как со стороны крупных городов из-за увеличения численности населения, так и со стороны различных отраслей промышленности. По нашему мнению, наиболее правильным решением сегодняшних проблем является разработка различных технологий, включающих в свой производственный цикл золошлаковые отходы как основное сырье [9-11]. Наиболее высокое их потребление может обеспечить, как известно [12-14], отрасль производства строительных материалов. Ранее нами выполнены исследования по оценке возможности использования золошлаковых смесей и зол уноса ТЭЦ Иркутской области в различных строительных материалах, таких как золощелочные вяжущие, композиционные вяжущие и бетоны на их основе. Проведя оценку структуры и свойств золошлаковых смесей, нами сделан вывод о возможности их использования в качестве основного сырья при получении зольной керамики. Ранее нами было показано, что она обладает высокими физико-механическими показателями, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 530-2012. Дальнейшие исследования нацелены на внедрение достигнутых результатов в производственный процесс получения зольной керамики методом полусухого прессования. Одним из важнейших показателей является прочность сырца, поскольку при её низких значениях существенно снижаются физико-механические характеристики готовых изделий [15, 16]. В связи с этим целью работы явилась оценка эффективности золошлаковых смесей ТЭЦ для производства изделий строительной керамики. К задачам исследования относятся изучение свойств этих смесей и установление влияния технологических факторов на прочность образца-сырца зольной керамики в процессе сушки при традиционном способе производства методом полусухого прессования.

## 2. Материалы и методы

В работе была изучена золошлаковая смесь (ЗШС) ТЭЦ-10 ОАО «Иркутскэнерго» с удельной поверхностью 1750 см<sup>2</sup>/г, насыпной плотностью в исходном состоянии – 0,93 г/см<sup>3</sup>, истинной плотностью – 1,97 г/см<sup>3</sup>.

Минералогический состав ЗШС определяли методами рентгенофлуоресцентного и полного силикатного анализа на спектрометре S4 Pioneer. Количественный фазовый анализ золы проводили с помощью внутреннего эталона, в качестве которого использован корунд. Каждую пробу золы «снимали» трижды с перенабивкой кюветы. Расчеты выполняли в программе TOPAS4. Удельную поверхность определяли с помощью ПСХ-12.

Комплексную оценку сырьевой прочности образцов в зависимости от таких показателей как удельная поверхность ЗШС, формовочная влажность и давление прессования проводили с помощью регрессионного анализа. Он представлял собой 2-х уровневый 3-х факторный эксперимент (2<sup>3</sup>). Матрица планирования приведена в табл. 1, факторы и интервал варьирования – табл. 2.

Перед использованием для изготовления образцов ЗШС высушивали до постоянной массы и подвергали помолу в вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3 до удельной поверхности 2000 и 6000 см<sup>2</sup>/г в соответствии с матрицей планирования. Из молотой ЗШС формовали образцы сырца цилиндрической формы диаметром и высотой 50 мм при давлении прессования 15 и 25 МПа и влажностью 8 и 12 %, которые также принимали соответственно матрице планирования. По стандартным методикам определяли плотность и прочность на сжатие образца-сырца непосредственно после его формования и после сушки до постоянной массы. После обжига образцов определяли плотность черепка зольной керамики, прочность при сжатии и водопоглощение в соответствии с положениями ГОСТ 530-2012.

Таблица 1

Матрица планирования

Номер состава	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+	-	-	+
2	+	+	-	+
3	+	-	+	+
4	+	+	+	+
5	+	-	-	-
6	+	+	-	-
7	+	-	+	-
8	+	+	+	-

Таблица 2

Факторы и интервал варьирования

Факторы	Уровень фактора			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
X <sub>1</sub> – удельная поверхность см <sup>2</sup> /г	2000	4000	6000	2000
X <sub>2</sub> – давление прессования, МПа	15	20	25	5
X <sub>3</sub> – формовочная влажность смеси, %	8	10	12	2

### 3. Результаты и их обсуждение

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа определен химический и минералогический состав ЗШС, которые представлены в табл. 3 и табл. 4, соответственно.

Таблица 3

Химический состав ЗШС

Наименование показателя	Значение показателя, %
SiO <sub>2</sub>	49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	17
MgO	1,5
CaO	5,7
SO <sub>3</sub>	0,3
п.п.п.	0,6
сумма	96,1

Таблица 4

Содержание минералов в ЗШС

Название минерала	Содержание, %
Кварц	20
Альбит	6
Муллит	12
Стеклофаза	62

Как видно из табл. 3 и табл. 4, ЗШС представляет собой алюмосиликатный материал со значительным содержанием аморфной стеклофазы, достигающей 62 %.

На основании матрицы планирования для каждого из восьми составов были получены значения плотности и прочности на сжатие (в МПа) образца-сырца, которые приведены в табл. 5.

Как следует из табл. 5, фактические значения прочности на сжатие образцов сырца до и после сушки существенно отличаются, как и их плотность (от 4 до 9 %). Снижение прочности обусловлено удалением влаги, а именно адсорбированной на поверхности твердых частиц, которая, как известно, находится в твердоподобном уплотненном (до  $2 \text{ г/см}^3$ ) состоянии.

Достоверность представленных результатов была получена путем расчета доверительного интервала, однородности дисперсий с помощью критериев Кохрена (табл. 6), проверки модели на адекватность с учетом коэффициентов Фишера (табл. 7).

Таблица 5

## Прочность и плотность образцов сырца, отформованных из ЗШС

№ состава в матрице	Прочность на сжатие образца-сырца, МПа		Плотность образца-сырца, кг/м <sup>3</sup>	
	до сушки (R <sub>1</sub> )	после сушки (R <sub>2</sub> )	до сушки	после сушки
1	0,17	0,13	1470	1380
2	0,32	0,32	1395	1330
3	0,2	0,18	1486	1380
4	0,5	0,48	1446	1380
5	0,3	0,24	1540	1390
6	0,25	0,24	1480	1348
7	0,4	0,34	1560	1427
8	0,45	0,43	1530	1410

Таблица 6

## Значения коэффициентов Кохрена среднего и максимального квадратичного отклонения образцов до и после сушки

Наименование показателя	Значение показателя	
	до сушки	после сушки
$\max \hat{S}_2$	0,001	0,00013
G <sub>расч</sub>	0,598	0,364
G <sub>табл</sub>	0,615	0,615
Выводы об однородности дисперсии	G <sub>расч</sub> < G <sub>табл</sub> ., значит дисперсия однородна	
S <sup>2</sup> <sub>{y}</sub>	0,000106	0,000024

Таблица 7

## Значения коэффициентов Фишера и дисперсии адекватности модели образцов до и после сушки

Наименование показателя	Значение показателя	
	до сушки	после сушки
S <sub>2ад</sub>	0,0002	0,0000023
F <sub>набл</sub>	2,088	0,1
F <sub>табл</sub>	2,38	2,38
Проверка адекватности модели	модель адекватна, т.к. F <sub>набл</sub> < F <sub>табл</sub>	
Дисперсия коэффициента регрессии	0,00001	0,0089
Квадратичная ошибка коэффициента регрессии	0,0032	0,094
Коэффициент Стьюдента	2,92	2,92

На основании результатов испытаний, полученных в соответствии с методом математического планирования, было выведено уравнение регрессии прочности при сжатии образца-сырца:

- до сушки:

$$R_1 = 0,33 + 0,06X_1 + 0,074X_2 - 0,024X_3 + 0,036X_1X_2 + 0,064X_1X_3 - 0,05X_2X_3 \quad (1)$$

- после сушки:

$$R_2 = 0,3 + 0,08X_1 + 0,06X_2 - 0,02X_3 + 0,026X_1X_2 + 0,05X_1X_3 - 0,014X_2X_3 \quad (2)$$

Из анализа полученных уравнений регрессии следует, что коэффициенты указывают на нелинейную зависимость изменения прочности сырца. Положительные значения коэффициентов при  $X_1$  и  $X_2$  дают основание утверждать, что наибольший вклад в её рост вносят такие факторы как удельная поверхность ЗШС и давление прессования. Поскольку значение коэффициента при  $X_2$  во втором уравнении выше на 33 %, чем в первом, удельная поверхность существенней оказывает влияние на сырцовую прочность образцов после их сушки. Давление прессования наоборот способствует росту этой прочности до сушки. Закономерно, что их совместное парное влияние также положительно отражается на сырцовой прочности. Отрицательные значения коэффициентов при факторе  $X_3$  указывает на негативное влияние формовочной влажности как до, так и после сушки.

При обжиге образцов пятого состава при температуре 1150 °С с длительностью изотермической выдержки один час был получен черепок зольной керамики со следующими физико-механическими характеристиками: плотность 1520 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие 22 МПа, водопоглощение по массе 13 %, что соответствует нормативным требованиям ГОСТ 530-2012.

#### 4. Заключение

На основании проведенной работы сформулированы следующие выводы:

1. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности производства керамических строительных изделий на основе золошлаковых смесей ТЭЦ-10. Это позволяет решать задачи по утилизации крупнотоннажных отходов, сбережении природных ресурсов и защите окружающей среды.

2. Изучено влияние ряда технологических факторов на сырцовую прочность образцов, приготовленных на основе ЗШС. Показано, что наибольший вклад как до, так и после их сушки оказывает удельная поверхность и давление прессования. При этом формовочная влажность негативно отражается на прочности. При обжиге образцов обеспечиваются повышенные физико-механические показатели: плотность 1520 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие 22 МПа, водопоглощение 13 %.

3. Показана возможность получения изделий на основе ЗШС методом полусухого прессования с показателями, удовлетворяющими требованиями ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», что позволяет рекомендовать их для широкого применения на заводах строительной керамики в качестве сырьевых материалов.

#### Список литературы/References

1. Щербаков Егор. Золошлаковая революция // Сибирский энергетик. 04.09.2015. № 33 (444) [Shcherbakov Egor. Ash and slag revolution // Siberian energy engineer. 09.04.2015. № 33 (444)].
2. Хамраева Р. Б., Герасимова А. А., Сафронов М. В. Перспективы переработки золошлаковых отходов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 2. № 4 (14). С. 759–761 [Khamraeva R. B., Gerasimova A. A., Safronov M. V. Prospects for processing ash and slag waste // Current problems of aviation and astronautics. 2018. Vol. 2. №. 4 (14). P. 759–761].
3. Гальцева Н. А., Попов П. В., Котов Д. А., Голотенко Д. С. Вторичное использование отходов промышленности // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5. [Galtseva N.A. Popov P. V., Kotov D. A., Golotenko D. S. Recycling of industrial waste // Engineering Bulletin of the Don. 2022. № 5] URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7651> (reference date: 16.10.2023).
4. Tahami S. A., Arabani M., Mirhosseini, A. F. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. Construction and Building Materials. vol. 170. P. 547-556.
5. Макаров Д. В., Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Кумарова В. А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254–

- 281 [Makarov D. V., Melkonyan R. G., Suvorova O. V., Kumarova V. A. Prospects for the use of industrial waste for the production of ceramic building materials // Mining information and analytical bulletin. 2016. № 5. P. 254–281].
6. Скрипникова Н. К., Юрьев И. Ю. Комплексное использование золошлаковых отходов Томской области для получения различных видов строительных материалов // Вестник ТГАСУ. 2013. № 2. С. 245–249 [Skripnikova N. K., Yuryev I. Yu. Integrated use of ash and slag waste from the Tomsk region for the production of various types of building materials // Vestnik TGASU. 2013. № 2. P. 245–249].
  7. Zhang L. Production of bricks from waste materials – A review // Construction and Building Materials. 2013. V. 47. P. 643–655. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
  8. Sharma G., Mehla S. K., Bhatnagar T., Bajaj A. Possible use of fly ash in ceramic industries: an innovative method to reduce environmental pollution // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2013. Vol. 22. P. 99–102. DOI: 10.1142/S2010194513009975.
  9. Яхонова Д.В., Ляшенко А.Г., Вяльцев А.В. Вторичное использование золошлаковых отходов в дорожном строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 [Yakhonova D.V., Lyashenko A.G., Vyaltsev A.V. Recycling of ash and slag waste in road construction // Engineering Bulletin of the Don. 2022. № 11]. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8025>.
  10. Kusiorowski R., Gerle A., Dudek K., Związek K. Application of hard coal combustion residuals in the production of ceramic building materials // Construction and Building Materials. 2021. V. 304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124506> (reference date: 16.10.2023).
  11. Gómez-Ladrón de Guevara, P., Galindo, M., & Gil, C. Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material // Materiales de Construcción. 2019. V. 69. № 334. P. 190.
  12. Bieliatynskiy A. et al. Prospects for the Use of Ash and Slag Waste in the Construction of Road Pavement // Balt. J. Road Bridg. Eng. 2022. V. 17. № 4. P. 80–94. DOI: 10.7250/bjrbe.2022-17.580.
  13. 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 // Sustainability 2022. 14 (11): 6740. DOI:10.3390/su14116740.
  14. R. Galeev, R. Nizamov, L. Abdrakhmanova, V. Khozin. Resource-saving polymer compositions for construction purposes // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012111. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012111. – EDN LOMNOQ.
  15. Юрьев И. Ю., Скрипникова Н. К., Волокитин О. Г. Исследование влияния модифицированных золошлаковых отходов на свойства обжиговых керамических изделий // Вестник ТГАСУ. 2013. № 4. С. 191–196 [Yuryev I. Yu., Skripnikova N. K., Volokitin O. G. Study of the influence of modified ash and slag waste on the properties of fired ceramic products // Vestnik TGASU. 2013. № 4. P. 191–196].
  16. The Effect of Mechanical Activation on the Stabilization of Ash Properties of Krasnoyarsk CHP // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. № 11 (7). P. 842–855. DOI: 10.17516/1999-494X-0099.

#### Информация об авторах

**Макаренко Сергей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация.

Email: [makarenko\\_83\\_07@mail.ru](mailto:makarenko_83_07@mail.ru)

**Гонжитов Алдар Борисович**, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация.

Email: [gonzhitov1999@yandex.ru](mailto:gonzhitov1999@yandex.ru)

**Хохряков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

**Хозин Вадим Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

#### Information about the authors

**Sergey V. Makarenko**, candidate of technical sciences, associate professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Email: makarenko\_83\_07@mail.ru

**Aldar B. Gonzhitov**, post-graduate student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Email: gonzhitov1999@yandex.ru

**Oleg V. Khokhryakov**, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ninamor@mail.ru

**Vadim G. Khozin**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: khozin.vadim@yandex.ru