

Научная статья

УДК 691.32

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/105-116>

Сравнение эффективности модификации цементных бетонов золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком

Надежда Игоревна Никора, Александр Леонович Маилян, Дарья Юрьевна Рыженкова, Валерия Сергеевна Сытик, Анастасия Михайловна Ельшаева✉, Алексей Олегович Косых, Даниил Олегович Бахарев

Донской государственный технический университет,

Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ anastasiya_el05@mail.ru

Аннотация. Проблема утилизации таких промышленных отходов, как зола-уноса (ЗУ) и молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ), в настоящее время является актуальной и требует решений, направленных на её устранение. Целью данного исследования является разработка экологичных и экономически эффективных составов бетона, изготовленных с применением промышленных отходов. Всего было изготовлено 13 экспериментальных составов бетона с заменой части цемента на ЗУ и МДГШ от 0 до 30% с шагом 5%. Исследовались свойства бетонных смесей и бетонов. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что оптимальное количество замены части цемента как для ЗУ, так и для МДГШ составляет 15%. Прирост прочности на сжатие для бетона с ЗУ составил 18,6%, для бетона с МДГШ – 14,4%. Значения водопоглощения снизились на 15,2 и 13,7% соответственно. Полученные в ходе исследования результаты доказывают, что предложение по применению промышленных отходов в виде золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака при изготовлении бетонов является рациональным и позволяет решить проблему их утилизации. Сами же бетоны обладают улучшенными свойствами и являются более экологичными и экономичными.

Ключевые слова: зола-уноса, молотый доменный гранулированный шлак, бетон, прочность на сжатие, промышленные отходы

Для цитирования: Никора Н.И., Маилян А.Л., Рыженкова Д.Ю., Сытик В.С., Ельшаева А.М., Косых А.О., Бахарев Д.О. Сравнение эффективности модификации цементных бетонов золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 105–116.

Original article

Comparison of the efficiency of modification of cement concrete with fly ash and ground blast furnace granulated slag

Nadezhda I. Nikora, Alexander L. Mailyan, Daria Y. Ryzhenkova, Valeria S. Sytik, Anastasia M. Yelshaeva✉, Alexey O. Kosykh, Daniil O. Bakharev

Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ anastasiya_el05@mail.ru

Abstract. The problem of utilization of such industrial waste as fly ash (FA) and ground blast furnace granulated slag (GBGS) is currently relevant and requires solutions aimed at its elimination. The purpose of this study is to develop environmentally friendly and cost-effective concrete compositions manufactured using industrial waste. A total of 13 experimental concrete compositions were manufactured with a portion of cement

replaced with FA and GBGS from 0 to 30% with a step of 5%. The properties of concrete mixtures and concretes were studied. Based on the results of experimental studies, it was found that the optimal amount of replacement of a portion of cement for both FA and GBGS is 15%. The increase in compressive strength for concrete with FA was 18.6%, for concrete with GBGS – 14.4%. Water absorption values decreased by 15.2 and 13.7%, respectively. The results obtained during the study prove that the proposal to use industrial waste in the form of fly ash and ground blast furnace granulated slag in the production of concrete is rational and allows solving the problem of their disposal. The concretes themselves have improved properties and are more environmentally friendly and economical.

Keywords: fly ash, ground blast furnace granulated slag, concrete, compressive strength, industrial waste

For citation: Nikora N.I., Mailyan A.L., Ryzhenkova D.Y., Sytik V.S., Yelshaeva A.M., Kosykh A.O., Bakharov D.O. Comparison of the efficiency of modification of cement concrete with fly ash and ground blast furnace granulated slag. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 105–116. (In Russ.).

Введение

В настоящее время проблема утилизации отходов промышленности является одной из самых актуальных и требует поиска решений, направленных на её устранение. Современное строительное материаловедение предлагает множество вариантов решения данной проблемы, которые основаны на применении отходов промышленности при изготовлении новых видов строительных материалов [1, 2]. Особенно развита тема утилизации различных видов отходов при изготовлении бетонных композитов. Зола-уноса, являющаяся отходом теплоэлектростанций, и молотый доменный гранулированный шлак, который является техногенным отходом выплавки железной руды, имеют химический состав, подходящий для применения в технологии бетонных композитов вместо части цемента [3, 4].

В работе [5] доказана перспективность применения золы-уноса (ЗУ) как альтернативной добавки, заменяющей часть цемента и увеличивающей прочностные свойства бетона в 1,3 раза. В исследовании [6] авторами были разработаны составы облегчённых бетонов с 40% содержания ЗУ и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Введение ЗУ снижает процессы трещинообразования и величину усадки в процессе твердения бетона [7]. Также ЗУ нашла широкое применение в технологии геополимерных бетонов [8]. Смесь ЗУ и золы жома сахарного тростника в соотношении 90/10, затворённая щелочным активатором после отверждения, образует композит с прочностью на сжатие до 75 МПа [9]. Аналогично и в других исследованиях при оптимальном подборе рецептуры удалось получить геополимерные композиты на основе ЗУ с высокими прочностными свойствами [10, 11].

Молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ) также активно применяется в качестве минеральной добавки, заменяющей часть цемента [12]. Введение 30% МДГШ в состав самоуплотняющихся бетонов позволяет снизить их усадку и сохранить прочностные свойства на требуемом уровне [13]. В исследовании [14] МДГШ в количестве 10% обеспечивает прирост прочности на сжатие в 7-суточном возрасте до 11%. Также на основе шлака разработано множество геополимерных композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и повышенной стойкостью к различным агрессивным воздействиям [15–17].

Таким образом, научной новизной исследования будут являться новые составы бетонов с добавками золы и шлака и зависимости между свойствами бетона и количеством вводимых минеральных добавок.

Целью данного исследования является разработка экологичных и экономически эффективных составов бетонов, модифицированных минеральными добавками в виде золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака.

Основные задачи исследования:

- проведение экспериментальных исследований по подбору оптимальной рецептуры экономичного и экологичного бетона, модифицированного золой и шлаком;
- определение характеристик бетона, модифицированного различным количеством золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака.

Материалы и методы

Для изготовления экспериментальных образцов бетона применялось следующее основное сырье:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ЦЕМРОС, г. Москва, Россия);
- гранитный щебень (ООО «Солнцедар-Дон», г. Ростов-на-Дону, Россия);
- песок кварцевый (ООО «Дон Ресурс», г. Кагальник, Россия).

Свойства сырьевых компонентов представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Свойства сырьевых компонентов
Properties of raw materials components

Наименование компонента	Свойство	Фактическое значение
Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н	Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	3402
	Нормальная густота, %	29,7
	Сроки схватывания, мин. – начало – конец	150 240
	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	53,9
Гранитный щебень	Размер зёрен, мм	5–20
	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1390
	Истинная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	2565
	Дробимость, % по массе	11,8
	Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, % по массе	10,9
Песок кварцевый	Модуль крупности	1,85
	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,52
	Истинная плотность зёрен, $\text{кг}/\text{м}^3$	2591
	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1457

Гранулометрический состав крупного и мелкого заполнителя представлен на рисунке 1.

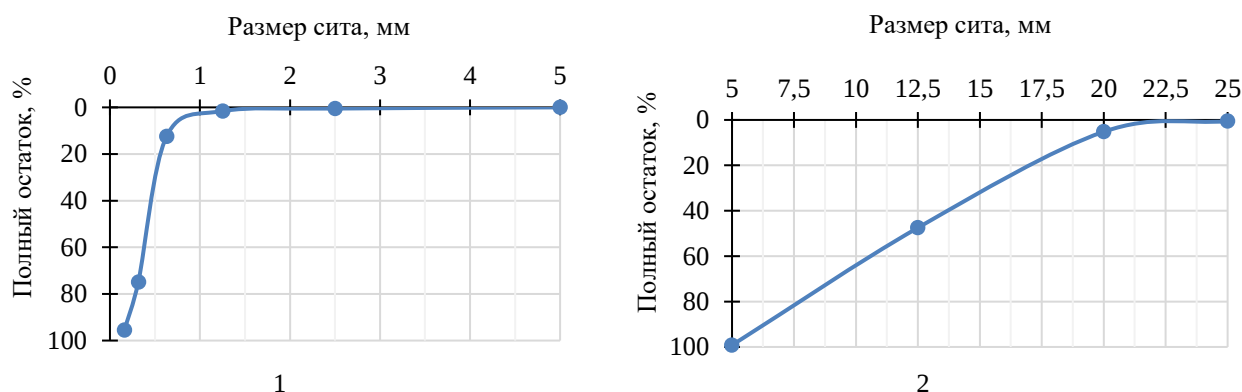


Рис. 1. Гранулометрический состав:
1 – песок; 2 – щебень

Fig. 1. Granulometric composition: 1 – sand; 2 – crushed stone

Щебень имел размер зёрен от 5 до 20 мм (рис. 1.2), модуль крупности кварцевого песка составил 1,85 (рис. 1.1).

В качестве модифицирующих добавок, заменяющих часть цемента, применялись зола-уноса (Завод № 7, г. Тула, Россия) и молотый доменный гранулированный шлак (НЛМК, г. Липецк, Россия). Химические составы золы и шлака представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Химические составы золы и шлака
Chemical compositions of ash and slag

Оксид	Содержание в золе, мас. %	Содержание в шлаке, мас. %
SiO ₂	50,1	37,81
Al ₂ O ₃	37,1	5,95
Fe ₂ O ₃	6,01	0,31
CaO	2,79	49,3
TiO ₂	1,39	2,01
K ₂ O	1,05	0,32
MgO	0,43	3,16
SO ₃	0,72	–
ZrO ₂	0,13	0,03
P ₂ O ₅	0,1	0,01
SrO	0,04	–
ZnO	0,04	–
Cr ₂ O ₃	0,02	–
MnO	0,02	–
Y ₂ O ₃	0,02	–
Na ₂ O	0,02	1,1
PbO	0,01	–
CuO	0,005	–
NiO	0,001	–
Rb ₂ O	0,004	–

Эффективность модифицирующих добавок оценивалась путём их введения в состав бетона вместо части цемента в количестве от 5 до 30% с шагом 5%.

Также дополнительно применялась пластифицирующая добавка ПК1 на поликарбоксилатной основе (ГК «Полипласт», г. Москва, Россия).

Экспериментальные составы бетонных смесей с различным количеством золы-уноса (ЗУ) и молотого доменного гранулированного шлака (МДГШ) представлены в таблице 3.

Изготовление экспериментальных образцов бетона, модифицированных ЗУ и МДГШ, осуществлялось следующим образом. Все сырьевые компоненты дозировались в соответствии с рецептурой и загружались в лабораторный бетономеситель в последовательности: цемент, песок, модифицирующая добавка и вода с растворённым в ней пластификатором. Далее смесь сырьевых компонентов перемешивалась до однородной консистенции. После получения однородной растворной смеси в неё вводился крупный заполнитель и всё снова перемешивалось. Готовая смесь заливалась в формы, которые после заливки уплотнялись на виброплощадке 60 секунд. Поверхность образцов заглаживалась и выравнивалась. Через сутки образцы вынимались из форм и помещались в камеру нормального твердения на оставшиеся 27 суток.

Всего было изготовлено 78 кубов размером 100×100×100 мм.

Осадка конуса бетонных смесей определялась в соответствии с требованиями. Для определения осадки применялись металлический конус, металлический лист и штыковка. Перед определением осадки все инструменты протирались влажной тканью. Бетонная смесь загружалась в металлический конус в 3 слоя. Каждый их трёх слоёв уплотнялся 25 ударами штыковки. Перед снятием конуса с его верхней части убирались излишки смеси и поверхность заглаживалась. Затем конус быстрым и плавным движением поднимался вверх и устанавливался рядом с осевшей бетонной смесью. Осадка оценивалась как разница между высотой металлического конуса и наивысшей точкой осевшей бетонной смеси.

Таблица 3 / Table 3

Экспериментальные составы бетонных смесей
Experimental compositions of concrete mixtures

Тип состава	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Вода, л/м ³	Щебень, кг/м ³	Модифицирующая добавка		ПК1, кг/м ³
					кг/м ³	% вместо цемента	
Зола-уноса							
Контрольный	394	775	196	1098	0	0	3,83
ЗУ5	374,3	775	196	1098	19,7	5	3,83
ЗУ10	354,6	775	196	1098	39,4	10	3,83
ЗУ15	334,9	775	196	1098	59,1	15	3,83
ЗУ20	315,2	775	196	1098	78,8	20	3,83
ЗУ25	295,5	775	196	1098	98,5	25	3,83
ЗУ30	275,8	775	196	1098	118,2	30	3,83
Молотый гранулированный доменный шлак							
МДГШ5	394	775	196	1098	19,7	5	3,83
МДГШ10	374,3	775	196	1098	39,4	10	3,83
МДГШ15	354,6	775	196	1098	59,1	15	3,83
МДГШ20	334,9	775	196	1098	78,8	20	3,83
МДГШ25	315,2	775	196	1098	98,5	25	3,83
МДГШ30	295,5	775	196	1098	118,2	30	3,83

Прочность на сжатие определялась в соответствии с требованиями методики. Образцы-кубы устанавливались в лабораторную установку «П–50», нагрузка подавалась со скоростью нарастания $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. Прочность на сжатие бетона вычислялась по формуле (1):

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

A – площадь рабочего сечения образца, мм²;

α – коэффициент, учитывающий размеры образцов (для образцов со стороной 100 мм $\alpha = 0,95$).

Определение водопоглощения модифицированных бетонов осуществлялось в соответствии с требованиями. Значение водопоглощения вычислялось по формуле (2):

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100, \quad (2)$$

где m_b – масса насыщенного водой образца, г;

m_c – масса сухого образца, г.

Результаты

Результаты определения осадки конуса бетонных смесей, модифицированных золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком, представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что применение ЗУ и МДГШ в качестве частичной замены цемента снижает осадку бетонных смесей. Зависимость изменения осадки бетонных смесей от количества модифицирующей добавки носит прямой характер. Чем больше добавки, тем меньше осадка конуса бетонных смесей. При максимальном количестве 30% ЗУ осадка конуса равна 8 см, что на 52,9% меньше в сравнении с контрольной смесью. При 30% МДГШ осадка конуса бетонной смеси составила 6 см, что на 64,7% меньше состава без минеральных добавок. Данный эффект в первую очередь связан с тем, что частицы золы и шлака имеют более пористую структуру и на их смачивание уходит большее количество воды. Снижение осадки бетонных смесей при введении минеральных модифицирующих добавок подтверждается и рядом других исследований [18, 19].

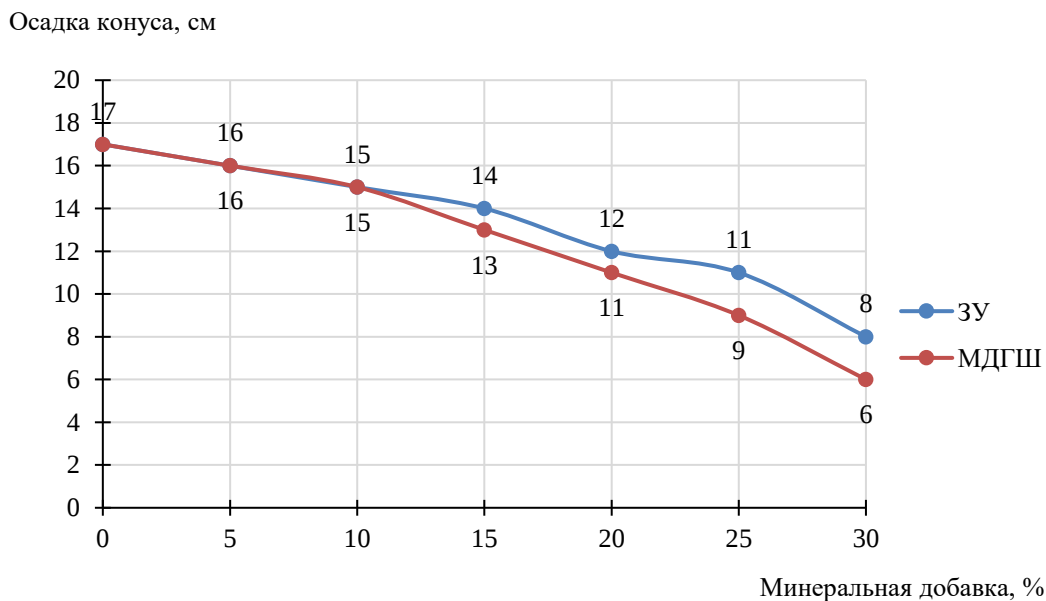


Рис. 2. Осадка конуса бетонной смеси при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 2. Sedimentation of the cone of the concrete mixture with different contents of FA and GBFGS

Далее, на рисунках 3 и 4 представлены результаты определения прочности на сжатие и водопоглощения бетонов с различным содержанием 3У и МДГШ.

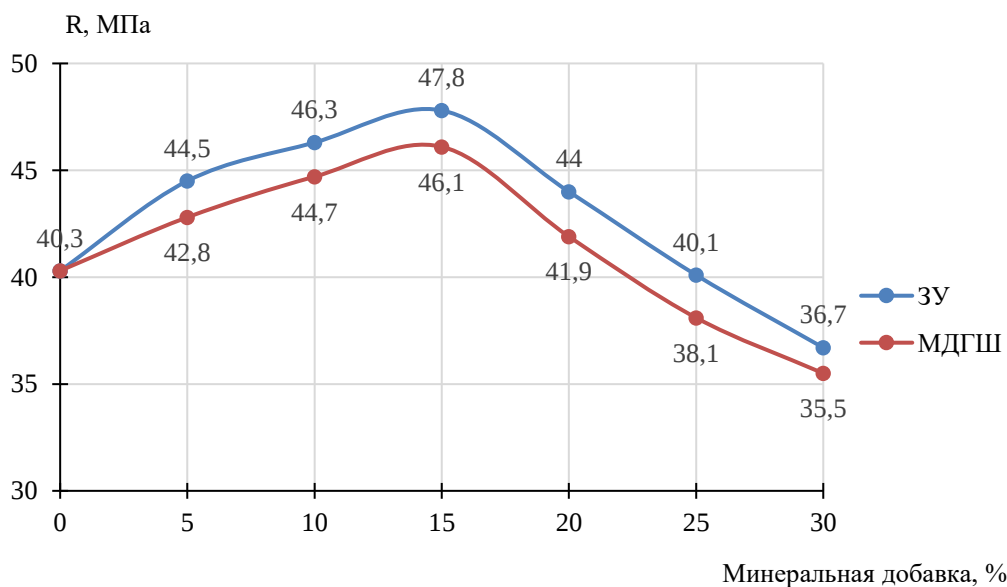


Рис. 3. Прочность на сжатие бетона при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 3. Compressive strength of concrete with different contents of FA and GBFG

Согласно рисунку 3, максимальные значения прочности на сжатие зафиксированы у бетонов с 15% 3У и МДГШ. Максимальное значение прочности на сжатие бетона с 3У составило 47,8 МПа, что на 18,6% больше, чем у контрольного состава. У бетона с МДГШ максимальное значение прочности на сжатие составило 46,1 МПа, что на 14,4% больше, чем у контрольного состава. В целом, положительное влияние модификации 3У и МДГШ на прочностные свойства композита наблюдается при замене до 20% цемента. Дальнейшее увеличение содержания 3У и МДГШ приводит к снижению прочностных свойств бетонного композита. Так, при максимальном содержании 3У и МДГШ прочность бетона на сжатие снизилась на 8,9% и 11,9% соответственно.

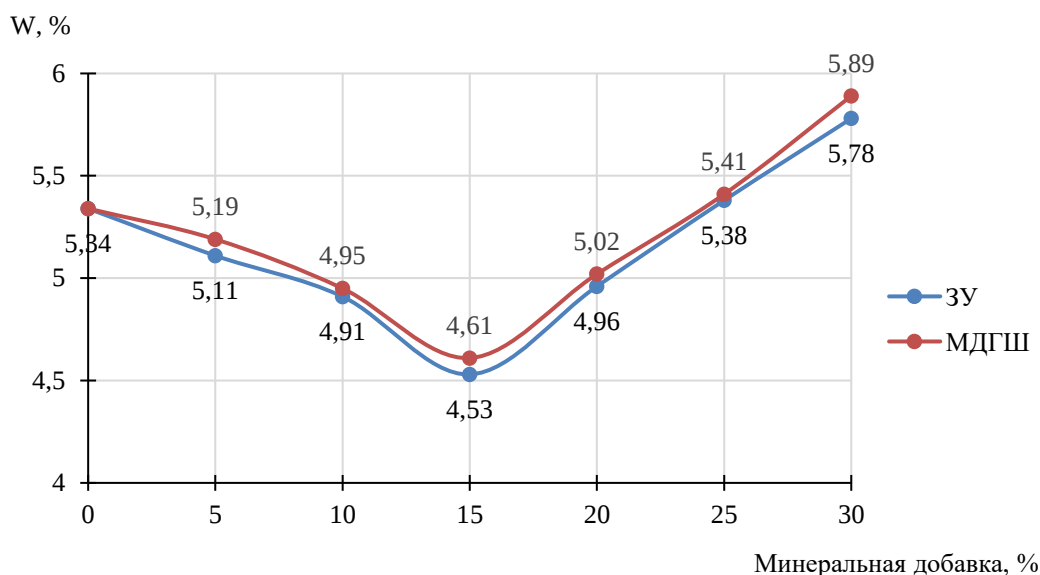


Рис. 4. Водопоглощение бетона при различном содержании 3У и МДГШ

Fig. 4. Water absorption of concrete with different contents of FA and GBFGS

Как и в случае с прочностью на сжатие, наилучшие характеристики бетона зафиксированы при модификации 3У и МДГШ в количестве 15%. Минимальное значение водопоглощения для бетона с 3У составило 4,53% и для бетона с МДГШ – 4,61%, что, соответственно, на 15,2% и 13,7% меньше значения водопоглощения контрольного состава. Введение модифицирующих добавок до 20% положительно влияет на водопоглощение бетона, способствуя его снижению. При более высоком содержании 3У и МДГШ наблюдается обратный эффект.

Положительный эффект от модификации бетонов 3У и МДГШ в оптимальных количествах (до 20%) объясняется свойствами самих минеральных добавок. Химический состав золы-уноса и молотого доменного гранулированного шлака характеризуется большим содержанием диоксида кремния (SiO_2) – 50,1% и 37,81% соответственно. Диоксид кремния активно вступает в реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который образуется в процессе гидратации цемента [20]. В результате взаимодействия активных компонентов золы и шлака с продуктами гидратации цемента образуется больше гидратированного силиката кальция и гидратированного алюмината кальция, что уменьшает внутренние поры бетона и делает внутреннюю структуру бетона более плотной и прочной. Соответственно, более высокие приросты прочности на сжатие и низкие значения водопоглощения при модификации золой-уноса, нежели при модификации молотым доменным гранулированным шлаком, определяются большим содержанием SiO_2 в её составе. Ухудшения свойств бетонных композитов при введении минеральных добавок более 20% связаны с тем, что снижается щёлочность жидкой фазы и не все активные компоненты добавок могут вступить в химические реакции. Вследствие чего во всём композите появляются зоны пониженной плотности, что и приводит к ухудшению его свойств [21–24].

Результаты, полученные в данном исследовании, имеют хорошую сопоставимость с работами других авторов. Например, применение 20% золы-уноса позволило повысить прочность бетона на сжатие до 13,22% и улучшить его стойкость к замерзанию и оттаиванию в морской воде [25]. Введение молотого доменного гранулированного шлака до 30% вместо части цемента улучшило прочность бетона на сжатие до 39% и повысило его кислотостойкость [26].

Таким образом, разработанные в данном исследовании цементные композиты с высоким содержанием техногенных отходов, введённых взамен части портландцемента, имеют высокую актуальность, в особенности для тех регионов, где существует проблема скапливания промышленных отходов [27, 28]. Они обладают достаточными прочностными свойствами и имеют обширную область применения в реальной строительной практике: их можно

активно применять для изготовления различных заводских изделий, а также в условиях строительной площадки. К основным преимуществам бетонов с ЗУ и МДГШ можно отнести их высокую экологичность, низкое углеродное воздействие на окружающую среду и экономичность [29, 30].

Выводы

Исследованы свойства бетонных смесей и бетонов, модифицированных золой-уноса и молотым доменным гранулированным шлаком. Определено оптимальное количество замены части цемента данными минеральными модифицирующими добавками.

1. Введение ЗУ и МДГШ вместо части цемента уменьшает осадку бетонных смесей. Зависимость снижения осадки конуса от количества модифицирующих добавок носит прямой характер. Минимальные значения осадки конуса зафиксированы при добавлении 30% ЗУ и МДГШ – 8 см и 6 см соответственно.

2. Оптимальное количество ЗУ и МДГШ – 15%. Приросты прочности на сжатие составили 18,6% и 14,4% соответственно. Водопоглощение снизилось на 15,2% и 13,7% соответственно. Модификация бетона ЗУ является наиболее эффективным рецептурным решением, так как обеспечивает большие приросты прочностных свойств бетона в сравнении с модификацией МДГШ.

3. Модификация бетона ЗУ и МДГШ до 20% позволяет получить экономичный и экологичный композит с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.Л. Маилан – окончательная редакция статьи, её согласование со всеми авторами; Д.О. Бахарев – изготовление образцов, проведение экспериментов, анализ результатов; В.С. Сытик – обработка данных эксперимента, построение графиков и таблиц для статьи; А.М. Ельшаева, Н.И. Никора – написание статьи; А.О. Косых – сбор, анализ и интерпретация материала для статьи; Д.Ю. Рыженкова – формулировка цели, задач исследования, общее руководство.

A.L. Mailyan – the final revision of the article, its coordination with all authors; D.O. Bakharev – the production of samples, experiments, analysis of results; V.S. Sytik – experimental data processing, construction of graphs and tables for the article; A.M. Elshaeva, N.I. Nikora – writing of the article; A.O. Kosykh – collection, analysis and interpretation of the material for the article; D.Yu. Ryzhenkova – formulation of the purpose, objectives of the study, general guidance.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н. Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. № 5(109). С. 132–147. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>.
2. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. 2024. № 2(1177). С. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88>.
3. Макаренко С.В., Лозовский Б.М., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 3(53). С. 39–46.
4. Путилова И.В. Современное состояние проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом // Альтернативная энергетика и экология. 2023. № 1(406). С. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.01.051-062>.
5. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Влияние режима перемешивания компонентов при изготовлении смесей с добавкой золы-уноса // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2, № 1. С. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10011>.

6. Шацкая В.А., Шитиков Е.С., Шацкий С.В. Разработка методов получения цементобетонных материалов повышенного качества с использованием техногенных отходов ТЭЦ // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 6(255). С. 94–97.
7. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7(79). С. 347–365.
8. Щербань Е.М. Современное состояние вопроса геополимерных бетонов в России и за рубежом // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 3(29). С. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.33.96.005>.
9. Rihan M.A.M., Alahmari T.S., Onchiri R.O., Gathimba N., Sabuni B. Impact of alkaline concentration on the mechanical properties of geopolymer concrete made up of fly ash and sugarcane bagasse ash // Sustainability [Internet]. 2024. Vol. 16. P. 28–41. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072841>.
10. Hussain S., Matthews J., Amritphale S., Edwards R., Matthews E., Paul N., Kraft J. Influence of steel and poly vinyl alcohol fibers on the development of high-strength geopolymer concrete // Minerals [Internet]. 2024. Vol. 14. P. 1007. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14101007>.
11. Luo J., Shi X., Wang Q., Dai J., Deng X., Xue Y. Study on improving measures of mechanical properties of geopolymer materials and its effect on CO₂ emission // Polymers [Internet]. 2023. Vol. 15. P. 1699. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071699>.
12. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мордовцева М.В. Молотый гранулированный доменный шлак – средство повышения эффективности и долговечности бетонов // Цемент и его применение. 2023. № 2. С. 62–69.
13. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А., Саденко С.М. Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 486–494.
14. Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р. Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства бетонов и бетонных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4(62). С. 61–69. DOI: https://doi.org/10.52409/20731523_2022_4_61.
15. Cheng J., Qin Y., Yao Z., Luo L., Qu C. Study on the chloride-sulfate resistance of a metakaolin-based geopolymer mortar // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 5045. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17205045>.
16. Girish M.G., Shetty K.K., Nayak G., Kamath K. Evaluation of mechanical, ecological, economical, and thermal characteristics of geopolymer concrete containing processed slag sand // Sustainability [Internet]. 2024. Vol. 16. P. 7402. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16177402>.
17. Liu M., Liu H., Hua M., Chen C., Wang X., Guo X., Ma T. Potential for recycling metakaolin/slag-based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>.
18. Akbulut Z.F., Yavuz D., Tawfik T.A., Smarzewski P., Guler S. Examining the workability, mechanical, and thermal characteristics of eco-friendly, structural self-compacting lightweight concrete enhanced with fly ash and silica fume // Materials [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143504>.
19. Ключев А.В., Ключев С.В., Щекина Н.А. Композиционные смеси с использованием природного и техногенного сырья // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. Т. 3, № 2(10). С. 7–11. DOI: https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_2_7.
20. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Экспериментально-теоретические предпосылки повышения прочности цементного камня тонкодисперсными минеральными добавками и добавкой, содержащей фуллерены // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1(49). С. 97–102.
21. Зазнаева Е.П., Демиденко Е.И. Роль тонкодисперсных минеральных добавок в составе сухих строительных смесей // Техника и технологии строительства. 2018. № 3(15). С. 8–12.
22. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М., Абдуллаев Р.М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе комплексной нанодобавки // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 6(786). С. 78–93. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93>.

23. Халюшев А.К., Прудников В.В., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне // Наукоедение. 2017. Т. 9, № 5. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>.
24. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Коробкин А.П., Налимова А.В., Серебряная И.А., Нажуев М.П. Разработка состава композиционного портландцемента на основе золошлаковой смеси Новочеркасской ГРЭС // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3(30). С. 148–153.
25. He J., Sun C., Wang X. Study on the effect of fly ash on mechanical properties and seawater freeze-thaw resistance of seawater sea sand concrete // Buildings [Internet]. 2024. Vol. 14. P. 2191. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14072191>.
26. Ahmad J., Martínez-García R., Szelag M., de Prado-Gil J., Marzouki R., Alqurashi M., Hussein E.E. Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete // Materials [Internet]. 2021. Vol. 14. P. 7497. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247497>.
27. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 1(85). С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.85.3>.
28. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkulina A., Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02318>.
29. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики // Экология и развитие общества: Труды IX Международной конференции, Санкт-Петербург, 19–24 июля 2005 года. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2005. С. 12–21.
30. Титова Л.А., Титов М.Ю., Бейлина М.И. [и др.] Эффективность применения гранулированных доменных шлаков при производстве бетонных смесей и бетонов // Бетон и железобетон. 2021. № 2(604). С. 16–20.

REFERENCES

1. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A., Leitsin V.N. Fly ash in the production of concrete for various purpose and dry construction mixtures. *Building and Reconstruction*, 2023, no. 5(109), pp. 132–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>
2. Astafyeva O.E. Application of ash and slag waste in the building materials industry. *Ugol'*, 2024, no. 2(1177), pp. 85–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88>
3. Makarenko S.V., Lazovskiy B.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. The effect of active pozzolanic fillers on the properties of fine-grained cement concrete. *News KSUAE*, 2020, no. 3(53), pp. 39–46. (In Russ.).
4. Putilova I.V. The current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2023, no. 1(406), pp. 51–62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.01.051-062>
5. Dmitrak Y.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z. Influence of the mode of mixing of components while manufacturing mixtures with additive ash down. *Vector of Geosciences*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 83–89. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10011>
6. Shatskaya V.A., Shitikov E.S., Shatsky S.V. Development of methods for producing high-quality cement-concrete materials using technogenic waste of thermal power plant. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2022, vol. 36, no. 6(255), pp. 94–97. (In Russ.).
7. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Influence of slag-alkaline binder structure modifiers on crack formation. *Engineering Journal of Don*, 2021, no. 7(79), pp. 347–365. (In Russ.).
8. Shcherban' E.M. The current state of the issue of geopolymer concrete in Russia and abroad. *Herald of GSTOU. Engineering Sciences*, 2022, vol. 18, no. 3(29), pp. 42–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.33.96.005>
9. Rihan M.A.M., Alahmari T.S., Onchiri R.O., Gathimba N., Sabuni B. Impact of alkaline concentration on the mechanical properties of geopolymer concrete made up of fly ash and sugarcane bagasse ash. *Sustainability [Internet]*, 2024, vol. 16, pp. 28–41. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072841>
10. Hussain S., Matthews J., Amritphale S., Edwards R., Matthews E., Paul N., Kraft J. Influence of steel and poly vinyl alcohol fibers on the development of high-strength geopolymer concrete. *Minerals [Internet]*, 2024, vol. 14, p. 1007. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14101007>

11. Luo J., Shi X., Wang Q., Dai J., Deng X., Xue Y. Study on improving measures of mechanical properties of geopolymer materials and its effect on CO₂ emission. *Polymers [Internet]*, 2023, vol. 15, p. 1699. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071699>
12. Ivanov I.M., Kramar L.Y., Mordovtseva M.V. Ground granulated blast-furnace slag as a means of increasing the efficiency and durability of concrete. *Cement and its Applications*, 2023, no. 2, pp. 62–69. (In Russ.).
13. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A., Sadenko S.M. Study of granulated blast furnace slag on the properties of fine-grained self-compacting concrete. *Engineering Journal of Don*, 2021, no. 8(80), pp. 486–494. (In Russ.).
14. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News KSUAE*, 2022, no. 4(62), pp. 61–69. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52409/20731523_2022_4_61
15. Cheng J., Qin Y., Yao Z., Luo L., Qu C. Study on the chloride-sulfate resistance of a metakaolin-based geopolymer mortar. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 5045. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17205045>
16. Girish M.G., Shetty K.K., Nayak G., Kamath K. Evaluation of mechanical, ecological, economical, and thermal characteristics of geopolymer concrete containing processed slag sand. *Sustainability [Internet]*, 2024, vol. 16, p. 7402. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16177402>
17. Liu M., Liu H., Hua M., Chen C., Wang X., Guo X., Ma T. Potential for recycling metakaolin/slag-based geopolymer concrete of various strength levels in freeze-thaw conditions. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091944>
18. Akbulut Z.F., Yavuz D., Tawfik T.A., Smarzewski P., Guler S. Examining the workability, mechanical, and thermal characteristics of eco-friendly, structural self-compacting lightweight concrete enhanced with fly ash and silica fume. *Materials [Internet]*, 2024, vol. 17, p. 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143504>
19. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Shchekina N.A. Composite mixtures using natural and man-made raw materials. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2023, vol. 3, no. 2(10), pp. 7–11. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_2_7
20. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Experimental and theoretical prerequisites for increasing the strength of cement stone with finely dispersed mineral additives and an additive containing fullerenes. *Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*, 2013, no. 1(49), pp. 97–102. (In Russ.).
21. Zaznaeva E.P., Demidenko E.I. The role of fine mineral additives in the composition of dry construction mixtures. *Construction Equipment and Technologies*, 2018, no. 3(15), pp. 8–12. (In Russ.).
22. Abdullaev M.A.V., Abdullaev A.M., Abdullaev R.M. High-strength fine-grained concrete based on complex nanoadditives. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2024, no. 6(786), pp. 78–93. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93>
23. Khalyushev A.K., Prudnikov V.V., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Nazhnev M.P. Estimation of efficiency of mineral additives combination in the fine-grained concrete. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no 5. (In Russ.). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>
24. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Korobkin A.P., Nalimova A.V., Serebryanaya I.A., Nazhnev M.P. Development of a composition of composite Portland cement based on ash and slag mixture of Novocherkassk State District Power Plant. *Scientific Bulletin SevKavGT*, 2017, no. 3(30), pp. 148–153. (In Russ.).
25. He J., Sun C., Wang X. Study on the effect of fly ash on mechanical properties and seawater freeze-thaw resistance of seawater sea sand concrete. *Buildings [Internet]*, 2024, vol. 14, p. 2191. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14072191>
26. Ahmad J., Martínez-García R., Szelag M., de Prado-Gil J., Marzouki R., Alqurashi M., Hussein E.E. Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete. *Materials [Internet]*, 2021, vol. 14, p. 7497. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247497>
27. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, no. 1(85), pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.85.3>
28. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkuln A., Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02318>

29. Alekseyko L.N., Taskin A.V. On complex processing of ash and slag waste of energy. *Ecology and Social Development: Proceedings of the IX International Conference*, St. Petersburg, July 19–24, 2005. International Academy of Sciences of Ecology, Human Safety and Nature, 2005. P. 12–21. (In Russ.).
30. Titova L.A., Titov M.Y., Beilina M.I. [et al.] The effectiveness of the use of granular blast furnace slags in the production of concrete mixtures and concretes. *Concrete and Reinforced Concrete*, 2021, no. 2(604), pp. 16–20. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Никора Надежда Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ nikorani@mail.ru

Nadezhda I. Nikora, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Construction of Unique Buildings and Structures», Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Маилян Александр Леонович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ mailyan_a@sroufo.ru

Alexander L. Mailyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Departments «Urban Construction and Agriculture», Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Рыженкова Дарья Юрьевна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ ryzhenkowa.dar@ya.ru

Darya Y. Ryzhenkova, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Сытик Валерия Сергеевна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ sytikv1704@mail.ru

Valeriya S. Sytik, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Ельшаева Анастасия Михайловна – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ anastasiya_el05@mail.ru

Anastasia M. Yelshaeva, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Косых Алексей Олегович – магистрант, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ cosyh.lesh@yandex.ru

Alexey O. Kosykh, Master's Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Бахарев Даниил Олегович – студент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация),
✉ danipy99@mail.ru

Daniil. O. Bakharev, Student, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 17.03.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 11.04.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.