

УДК 691.3

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.214781

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ БЕТОНА ЗОЛОСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ ДНЕСТРОВСКОЙ ГРЭС (УКРАИНА)

Дмитриева Н. В., Агафонова И. П., Бостан Н. С.

Объектом исследования являются образцы бетона, модифицированные золосодержащими наполнителями и пластификаторами. Как показывает практика, использование вторичных ресурсов является важным вопросом в области строительства и влечет за собой значительную экономию. Также рассмотрен вопрос с точки зрения защиты окружающей среды. Исследование было направлено на определение влияния модификации бетона золосодержащими отходами на прочностные характеристики на примере гидроэлектростанции Днестровской ГРЭС (Сокирянский район, Черновицкая область, Украина). Основная гипотеза исследования состоит в предположении, что варьирование таких компонентов, как зола-уноса, жидкого стекла и суперпластификаторов позволит получить бетон с заданными прочностными характеристиками. Для реализации цели, авторами было принято решение использовать в исследовании суперпластификатор SikaPlast-520N и БЕТО-пласт, портландцемент М400 и пески карьеров Парканского и Суклейского районов (Молдова). Согласно плану эксперимента, проводились исследования влияния условий твердения на структуру и свойства модифицированных образцов бетона. Испытание образцов разрушающими методами проводились в лаборатории непосредственно на гидравлическом прессе.

Представлены результаты экспериментов без добавления жидкого стекла и введением минимального количества золы-уноса и экспериментов с введением минимального количества золы-уноса и добавления 3 % жидкого стекла. Для определения динамики набора прочности испытания проводились на 7, 14 и 28 суток. Представленные результаты исследования образцов на 7 суток показали набор более 50 % прочности. Это свидетельствует о возможности сокращения периода выдерживания конструкционного бетона в опалубочной системе. Более полное и объективное представление о качестве бетона возможно при одновременном учете средней прочности бетона и его однородности.

Сегодня не существует единой теории, способной связать различные свойства цемента и наполнителя с конечными свойствами композитного материала. Вопрос модификации составов бетона при использовании мелкого заполнителя других карьеров требует дополнительных исследований. В то же время, результаты эксперимента показали, что использование микронаполнителей на основе отходов Днестровской ГРЭС дают широкие возможности не только для экономии вяжущих, но и для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов.

**Ключевые слова:** золосодержащие отходы, модификация бетона, зола-уноса, прочность бетона, портландцемент, суперпластификатор.

## 1. Введение

Использование вторичных минеральных ресурсов является актуальным направлением строительной индустрии, обеспечивая повышение конструктивного качества материалов, при этом экономя составляющие компоненты материалов, энерго- и трудозатрат. Немаловажным является и вопрос экологии, так как значительный вред окружающей среде наносит современная энергетика – источник большого количества отходов, например, золошлаковых. Количество только производимой золы-уноса во всем мире оценивается примерно в 780 миллионов тонн в год [1, 2]. Проблема отвалов золошлаковых отходов (ЗШО) поднимается во многих странах мира, так как зачастую они занимают большие площади. Они являются тем самым источником загрязнения окружающей среды, представляя угрозу для людей, флоры и фауны прилегающих территорий. В настоящее время, к примеру, доля используемых ЗШО в Украине составляет порядка 1 %, в России – 10 %, а США – около 20 % ЗШО. Европейские страны, где очень развит промышленный симбиоз, используют около 70 % образующихся ЗШО: в Великобритании – 60 %, в Германии – 72 %, в Финляндии – 84 % [3]. В Молдове, на основании анализа статистики [4], в 2017 году образовалось порядка 396 тыс. т отходов (в 2016 году – 313 тыс. т), из них: 211 тыс. т токсичных отходов и 185 тыс. т ( $740106 \text{ м}^3$ ) твердых бытовых отходов (ТБО). Однако согласно стратегии Приднестровской Молдавской Республики на 2019–2026 годы планируется реализация программы, направленная на стабилизацию и улучшение экологического состояния (очистные сооружения, объекты утилизации и переработки, возобновляемые источники энергии, комплексы по улучшению экологической обстановки) [5].

Вышеприведенные цифры подтверждают актуальность вопроса утилизации ЗШО в промышленных масштабах и требует дополнительных исследований по модификации составов бетона местными компонентами или вторичными продуктами промышленности. Это имеет практическую значимость как для индустрии строительных материалов, так и экологической обстановки республики. Таким образом, *объектом исследования* выбраны образцы бетона, модифицированные золосодержащими наполнителями и пластификаторами. А *цель работы* заключается в рассмотрении влияния модификации бетона золосодержащими отходами на прочностные характеристики на примере гидроэлектростанции Днестровской ГРЭС (Сокирянский район, Черновицкая область, Украина).

## 2. Методика проведения исследований

Для реализации поставленной цели исследования бетонов на основе жидкого стекла и золы-уноса проводились с использованием: суперпластификатора SikaPlast-520N и БЕТО-пласт, портландцемента М400 и песков карьеров Парканского и Суклейского районов (Молдова).

Исследования влияния условий твердения на структуру и свойства модифицированных образцов бетона проводились согласно плану эксперимента. Изготавливались серии образцов, в виде кубиков размерами 10x10x10 см для трех варьируемых факторов, представленных в (табл. 1).

**Таблица 1**

Уровни варьируемых факторов

Уровни факторов варьирования	Наименование факторов		
	Количество зола-уноса, % от массы цемента	Количество С-3, % от массы раствора	Жидкое стекло, % от массы раствора
	X1	X2	X3
-1	10	0.3	0
0	20	0.65	3
+1	30	1	6

Для проведения этапов эксперимента были разработаны планы проведения каждого этапа исследований. Условно их можно назвать буквами А1 (песок Парканского карьера) без добавления жидкого стекла и введением минимального количества золы-уноса и А2 (песок Суклейского карьера) с использованием: суперпластификатора SikaPlast-520N, а также Б1 (песок Парканского карьера) и Б2 (песок Суклейского карьера) – суперпластификатор БЕТО-пласт.

Методика обработки результатов исследований заключалась в анализе и обобщении построенных диаграмм зависимости влияния варьируемых факторов на прочность при сжатии материала.

Перед изготовлением образцов внутренние поверхности форм были тщательно очищены и покрыты тонким слоем смазки, не оставляющей пятен на поверхности образцов и не влияющей на свойства поверхностей бетона. После заполнения формы бетонной смесью с избытком, она устанавливается и жестко закрепляется на виброплощадке и подвергается вибрации до полного уплотнения, и с помощью появившегося цементного теста поверхность заглаживается кельмой (рис. 1).



**Рис. 1.** Изготовление образцов бетона

После изготовления образцы на протяжении суток хранились в формах, покрытых влажной тканью, в помещении с температурой воздуха  $+20\pm 2$  °С. После этого образцы вынимались из формы, маркировались и выдерживались до момента испытания в камере нормального твердения при температуре  $+20\pm 2$  °С и относительной влажности воздуха 95–100 %.

### **3. Результаты исследований и обсуждение**

Многокомпонентные бетоны в настоящее время получают все большее практическое применение, в состав которых входят: вяжущее, крупный и мелкий заполнители и наполнители (химические и минеральные добавки).

Наиболее остро стоит вопрос об использовании местных многокомпонентных добавок в Приднестровской республике, так как практически все добавки, используемые сегодня, импортируются. Это приводит к удорожанию бетонных изделий и влияет на рентабельность. Заполнение бетонов тонкодисперсными минеральными материалами с одновременным увеличением их физико-механических качеств считается одним из перспективных направлений сокращения себестоимости цементных бетонов.

В последние годы накоплен большой опыт по использованию отходов теплоэнергетики, таких как зол и шлаков, в качестве минеральных добавок в изготовлении растворов и бетонов.

Научным обоснованием возможности применения микродисперсий (МД) в составе цемента считается доктрина В. Н. Юнга. Он выработал представление о цементном камне, именовал его «микробетоном» и обосновал, собственно, что затвердевший цементный камень содержит большое количество непрореагировавших зерен цемента, которые возможно поменять без потери прочности соответствующими фракциями МД [6].

Основные положения по использованию тонкодисперсных МД в цементных системах заложили авторы работ [6, 7]. Развитие этого научного направления продолжили авторы исследований [8, 9].

Так, вторичное использование золошлаковых отходов ЗАО «Молдавская ГРЭС» в 2017 году другими предприятиями составило 25931 т (в 2016 году – 22846 т) [4].

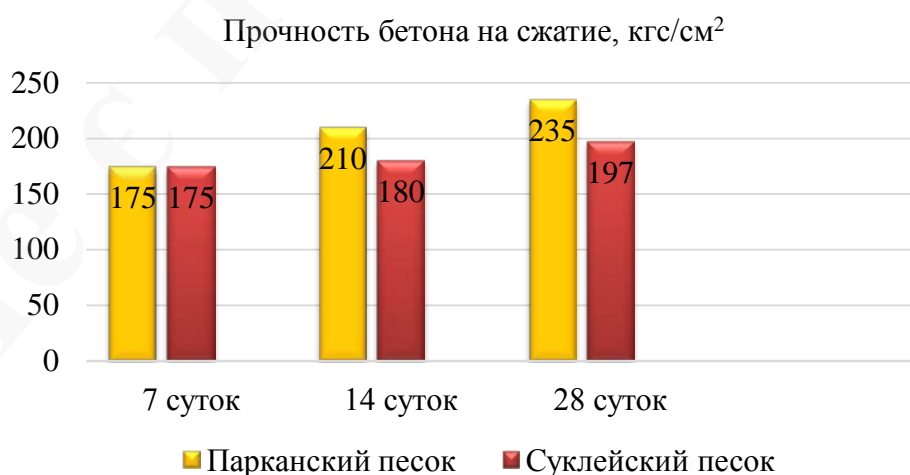
Основным направлением применения зол и шлаков в строительном комплексе является замена ими части портландцемента [10]. Вместе с тем, ряд зол обладают неудовлетворительными характеристиками при использовании их взамен части вяжущего вещества. Следовательно, необходимо искать другие направления эффективного применения зол, а также исследовать механизм их воздействия на структуру и свойства бетонов.

Не до конца понятен механизм влияния золосодержащей смеси на структуру и свойства бетонов при замене части массовой доли мелкого заполнителя, влияние водоцементного отношения и условий твердения.

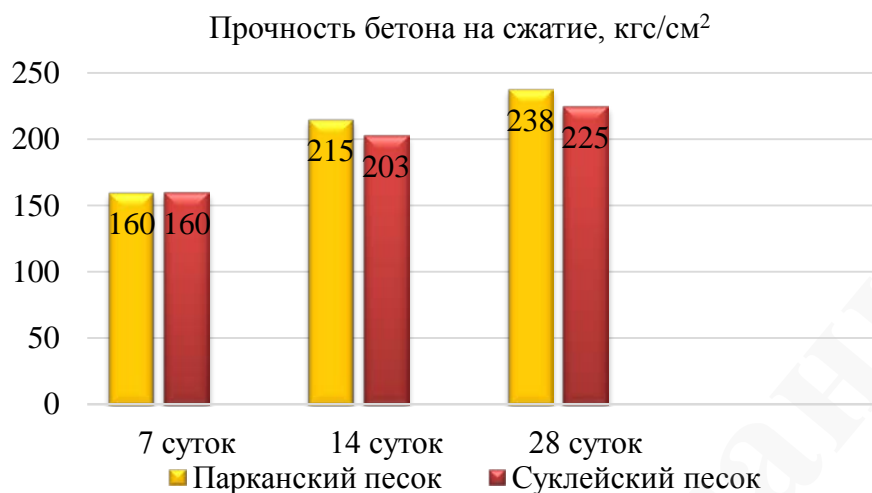
Главным показателем качества конструкционного бетона является его прочность. Прочность на сжатие является важнейшим классификационным показателем, характеризующим технические свойства бетона. Известно, что изменчивость прочностных характеристик бетона имеет случайный характер и подчиняется вероятностно-статистическим законам [11].

Основная гипотеза исследования состоит в предположении, что варьирование таких компонентов, как золы-уноса, жидкого стекла и суперпластификаторов позволит получить бетон с заданными прочностными характеристиками.

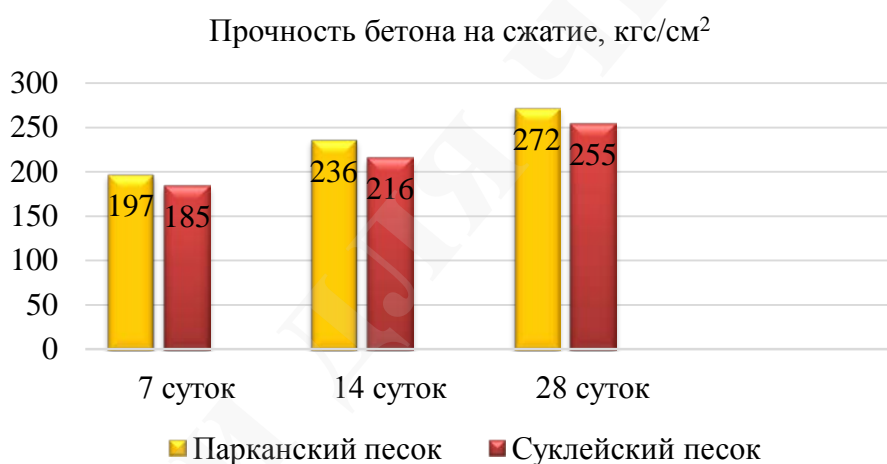
Испытание образцов разрушающими методами проводились в лаборатории непосредственно на гидравлическом прессе типа ПСУ-125 (Россия), подвергаясь опрессовыванию с постепенным, равномерным увеличением нагрузки (рис. 2–5).



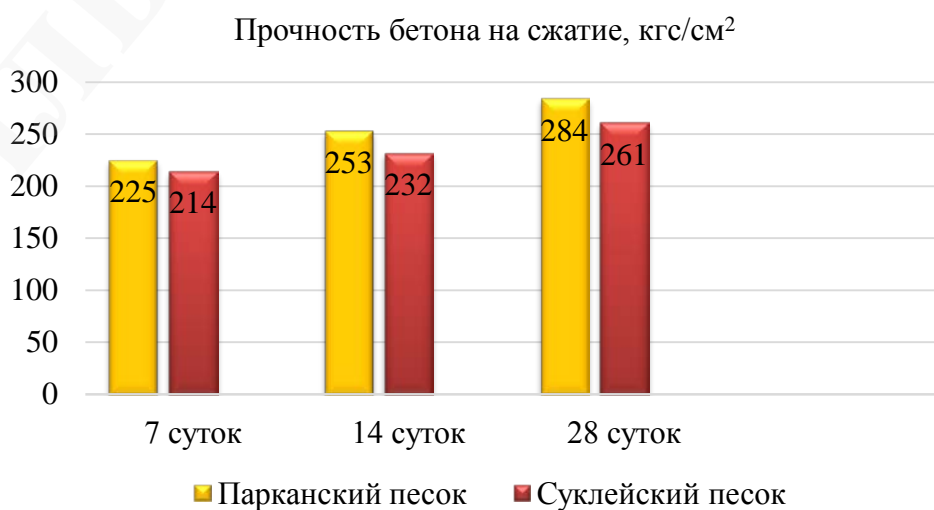
**Рис. 2.** Диаграмма набора прочности бетона на сжатие составов эксперимента А1 с введением минимального количества золы-уноса



**Рис. 3.** Диаграмма набора прочности бетона на сжатие составов эксперимента А2 с введением минимального количества золы-уноса



**Рис. 4.** Диаграмма набора прочности бетона на сжатие образцов эксперимента Б1 с введением минимального количества золы-уноса и добавлением 3 % жидкого стекла



**Рис. 5.** Диаграмма набора прочности бетона на сжатие образцов эксперимента Б2 с введением минимального количества золы-уноса и добавлением 3 % жидкого стекла

При лабораторных исследованиях определены следующие характеристики составляющих многокомпонентного бетона:

- влажность песка – 5 %;
- модуль крупности песка – 2,3;
- насыпная плотность песка – 1400 кг/м<sup>3</sup>;
- насыпная плотность щебня – 1280 кг/м<sup>3</sup>;
- модуль крупности золосодержащей смеси ГРЭС – 1,4.

Для определения динамики набора прочности испытания проводились на 7, 14 и 28 сутки.

Результаты исследований показали, что прочностные характеристики образцов, приготовленных с использованием песка Парканского карьера, выше, чем с использованием песка Суклейского карьера.

Стоит отметить, что на 7 сутки все образцы показали 50 % набора прочности от показателей на 28 сутки, что свидетельствует о возможности сокращения периода выдерживания конструкционного бетона в опалубочной системе.

Согласно нормативным базам: СНиП ПМР 52-01-02\* «Бетонные и железобетонные конструкции»; ДБНВ.2.6-98:2009 и ДСТУ БВ.2.7-176:2008 [12, 13] показатели прочности бетона на осевое сжатие образцов экспериментов Б1 и Б2 соответствуют классу по В20 (С16/20), образцов экспериментов А1 и А2 – В15 (С12/15).

Сегодня не существует единой теории, способной связать различные свойства цемента и наполнителя с конечными свойствами композитного материала. Различные исследователи приводят разное количество оптимального содержания наполнителя. Определение состава, соотношения и степени подготовки компонентов носит экспериментальный характер. В то же время результаты эксперимента показали, что использование микронаполнителей на основе отходов Днестровской ГРЭС дают широкие возможности не только для экономии вяжущих, но и для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов.

#### **4. Выводы**

При нормально-влажностных условиях твердения при замене золой-уноса части мелкого заполнителя преобладает механизм воздействия на структуру, связанный с оптимальным распределением частиц по размерам. Но колебания прочности в обеих партиях испытаний присутствуют, поэтому более полное и объективное представление о качестве бетона возможно при одновременном учете средней прочности бетона и его однородности. Поэтому вопрос модификации составов бетона требует дополнительных исследований. При этом образцам с показателями прочности ближе к средней характерна более высокая однородность бетона по прочности.

#### **Литература**

1. Al Bakri, A. M. M., Abdulkareem, O. A., Rafiza, A. R., Zarina, Y., Norazian, M. N., Kamarudin, H. (2013). Review on Processing of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7 (5), 342–349.

2. Duan, P., Yan, C., Zhou, W. (2016). Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer paste exposed to sulfate attack. *Ceramics International*, 42 (2), 3504–3517. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.154>
3. Kasimov, A. M., Udalov, I. V. (2015). Issledovanie protsessov migratsii ionov tiazhelykh i redkikh metallov v pochvakh v zone razmescheniia nakopitelei zoloshlakov ugolnykh TES. *Visnik Kharkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V. N. Karazina*, 43, 188–200.
4. *Ob utverzhdenii Strategii razvitiia Pridnestrovskoi Moldavskoi Respubliki na 2019–2026 god.* Available at: <http://president.gospmr.org/pravovye-akty/ukazi/ob-utverzhdenii-strategii-razvitiya-pridnestrovskoy-moldavskoy-respubliki-na-2019-2026-godi.html>
5. *Doklad o sostoianii okruzhaiuschei sredy v Pridnestrovskoi Moldavskoi Respubliki v 2017 g.* (2018). Tiraspol, 68. Available at: <http://gseco.gospmr.org/information/otchet/doklad-okr-sreda-2017.pdf>
6. Iung, V. N. (1951). *Osnovy tekhnologii viazhuschikh veschestv.* Moscow: Promstroizdat, 355.
7. Butt, Iu. M., Bakshutov, B. C., Iliukhin, V. V. (1972). O nekotorykh svoistvakh kristallov i srostkov gidrosilikatov kaltsiia i portlandita. *Ekspierimentalnye issledovaniia v sukhikh okisnykh i silikatnykh sistemakh.* Moscow: Nauka, 165–171.
8. Bazhenov, Iu. M., Demianova, V. S., Kalashnikov, V. I. (2006). *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony.* Moscow: Assotsiatsiia stroitelnykh vuzov, 368.
9. Dvorkin, L. I., Dvorkin, O. L. (2007). *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti.* Rostov-on-Don: Feniks, 368.
10. Chen, M., Blanc, D., Gautier, M., Mehu, J., Gourdon, R. (2013). Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Management*, 33 (5), 1268–1275. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.004>
11. Kapustin, F. L. (2011). Tekhnologicheskie i ekologicheskie aspekty primeneniia zoly-unosa Reftinskoii GRES pri proizvodstve stroitelnykh materialov. *Tekhnologii betonov*, 7-8, 64–65.
12. *DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktсии. Osnovni polozhennia.* Available at: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-792>
13. *DSTU BV.2.7-176:2008. Budivelni materialy. Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnichni umovy.* Available at: [http://gost.at.ua/\\_ld/33/3339\\_dstu-b-v.2.7-17.pdf](http://gost.at.ua/_ld/33/3339_dstu-b-v.2.7-17.pdf)