

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Научная статья

УДК 691.32

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/106-117>

## Состав и свойства бетона с частичной заменой цемента порошком яичной скорлупы

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](mailto:anastasiya_el05@mail.ru)

**Аннотация.** Применение различных видов отходов в строительной отрасли для изготовления новых видов экологически и экономически эффективных строительных материалов в настоящее время является актуальной и популярной темой. Целью данного исследования является разработка способа получения модифицирующей добавки на основе яичной скорлупы и подбор оптимальной рецептуры бетона, модифицированного такой добавкой. Изготовление модифицирующей добавки на основе яичной скорлупы включало в себя этапы очистки скорлупы, сушки, термической обработки и механического помола. Всего было изготовлено 5 экспериментальных составов бетона с заменой части цемента порошком яичной скорлупы от 0 до 20% с шагом 5%. Исследовались свойства бетонной смеси и бетона. По результатам экспериментальных исследований установлено, что оптимальный уровень замены части цемента составляет 10% и обеспечивает прирост прочности на сжатие до 8,9% и снижение водопоглощения до 10,3%. Полученные в ходе эксперимента результаты доказывают эффективность и возможность практического применения модифицирующей добавки на основе порошка яичной скорлупы в технологии бетонных композитов.

**Ключевые слова:** бетон, порошок яичной скорлупы, прочность на сжатие, модифицирующая добавка, цемент

**Для цитирования:** Никора Н.И., Маилян А.Л., Рыженкова Д.Ю., Сытик В.С., Ельшаева А.М., Косых А.О., Бахарев Д.О. Состав и свойства бетона с частичной заменой цемента порошком яичной скорлупы // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 106–117.

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article

## Composition and properties of concrete with partial replacement of cement with eggshell powder

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](mailto:anastasiya_el05@mail.ru)

**Abstract.** The use of various types of waste in the construction industry for the production of new types of environmentally friendly and cost-effective building materials is currently a relevant and popular topic. The purpose of this study is to develop a method for obtaining a modifying additive based on eggshells and to select the optimal formulation for concrete modified with such an additive. The production of a modifying additive based on eggshells included the stages of shell cleaning, drying, heat treatment and mechanical grinding.

ding. A total of 5 experimental concrete compositions were produced with a portion of cement replaced with eggshell powder from 0 to 20% in 5% increments. The properties of the concrete mixture and concrete were studied. Based on the results of experimental studies, it was found that the optimal level of replacement of a portion of the cement is 10% and provides an increase in compressive strength of up to 8.9% and a decrease in water absorption of up to 10.3%. The results obtained during the experiment prove the effectiveness and possibility of practical application of a modifying additive based on eggshell powder in concrete composite technology.

**Keywords:** concrete, eggshell powder, compressive strength, modifying additive, cement

**For citation:** Nikora N.I., Mailyan A.L., Ryzhenkova D.Y., Sytik V.S., Yelshaeva A.M., Kosykh A.O., Bakharov D.O. Composition and properties of concrete with partial replacement of cement with eggshell powder. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 106–117. (In Russ.).

## Введение

В настоящее время строительная отрасль является крупнейшим потребителем природного сырья. Большое потребление невозобновляемых природных ресурсов и выбросы углекислого газа при производстве цемента, который является основным материалом практически для всех зданий и сооружений, несомненно оказывают большой негативный эффект на экологическую обстановку [1, 2]. Эффективным решением данной проблемы будет снижение расхода цемента и применение в качестве его замены различных возобновляемых отходов при изготовлении бетона [3]. К таким отходам, в частности, относятся отходы сельскохозяйственной промышленности [4].

В России наиболее изученной и распространённой является тема применения золы рисовой шелухи в качестве минеральной добавки при изготовлении бетонов. Например, в работе [5] введение золы рисовой шелухи в количестве 6% вместо части цемента обеспечило приросты прочности на сжатие с 21 до 31 МПа. Введение золы рисовой шелухи в количестве 10% позволило получить бетонный композит с улучшенной морозостойкостью с маркой F600 [6]. Аналогично и в исследованиях [7, 8] модифицирующие добавки на основе отходов рисовой культуры оказали положительный эффект на эксплуатационные свойства бетона. Также в технологии бетонных композитов применяют и другие виды растительных сельскохозяйственных отходов. Применение вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли и рисовой шелухи позволило получить лёгкий бетон с улучшенными свойствами [9]. В исследовании [10] авторами были разработаны теплоизоляционные плиты с применением 50% пшеничной соломы, которая позволила снизить их коэффициент теплопроводности. Введение в состав бетона 2% кокосового волокна [11] улучшило его прочность на изгиб и трещиностойкость.

Помимо растительных сельскохозяйственных отходов в технологии цементных композитов применяются отходы аквакультуры [12]. Применение тонкомолотого порошка ракушек до 20% вместо части вяжущего вещества позволяет получать экологичные бетоны с приемлемыми прочностными свойствами [13]. Замена части обычного песка на песок раковин мидий позволила повысить эрозийную устойчивость бетонов для морского строительства. Положительный эффект модификации бетонов отходами аквакультуры подтверждается и рядом других исследований [14–16].

Яичную скорлупу, выбрасываемую в огромных количествах предприятиями по производству хлебобулочных и мучных кондитерских изделий, относят к сельскохозяйственным отходам. Яичная скорлупа имеет высокое содержание кальция. В основном она состоит из нескольких слоёв карбоната кальция, который, в свою очередь, является одним из основных компонентов для производства цемента. Таким образом, яичная скорлупа может использоваться как замена части цемента. Применение порошка яичной скорлупы ( $\text{CaCO}_3$ ) в качестве частичной замены цемента способствует повышению прочности на сжатие за счёт стабилизации этрингита и монокарбоната [17, 18]. Так, научной новизной исследования будет являться новый способ получения добавки для бетона из яичной скорлупы и новые зависимости между дозировкой порошка яичной скорлупы, заменяющей часть цемента, и свойствами получаемых бетонов.

Целью данного исследования является разработка способа получения модифицирующей добавки на основе яичной скорлупы и подбор оптимальной рецептуры бетона, модифицированного такой добавкой. Основные задачи исследования:

- приготовление модифицирующей добавки для бетонов на основе отходов яичной скорлупы;
- проведение экспериментальных исследований по подбору оптимальной рецептуры экономичного и экологичного бетона, модифицированного тонкомолотым порошком яичной скорлупы.

### Материалы и методы

В качестве вяжущего вещества в экспериментальных исследованиях применялся бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ОАО «Новоросцемент» (г. Новоросийск, Россия). Основные характеристики цемента и его минералогический состав представлены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

#### Свойства цемента Cement properties

Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин.	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа
3356	28,6	140 – начало 220 – конец	55,9
Минералогический состав			
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
67,2%	11,4%	7,9%	13,5%

В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень производства АО «Павловск неруд» (г. Павловск, Россия). Физико-механические характеристики крупного заполнителя представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

#### Свойства щебня Properties of crushed stone

Фракция	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Дробимость, % по массе	Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, % по массе
5-20	1378	2609	11,2	8,5

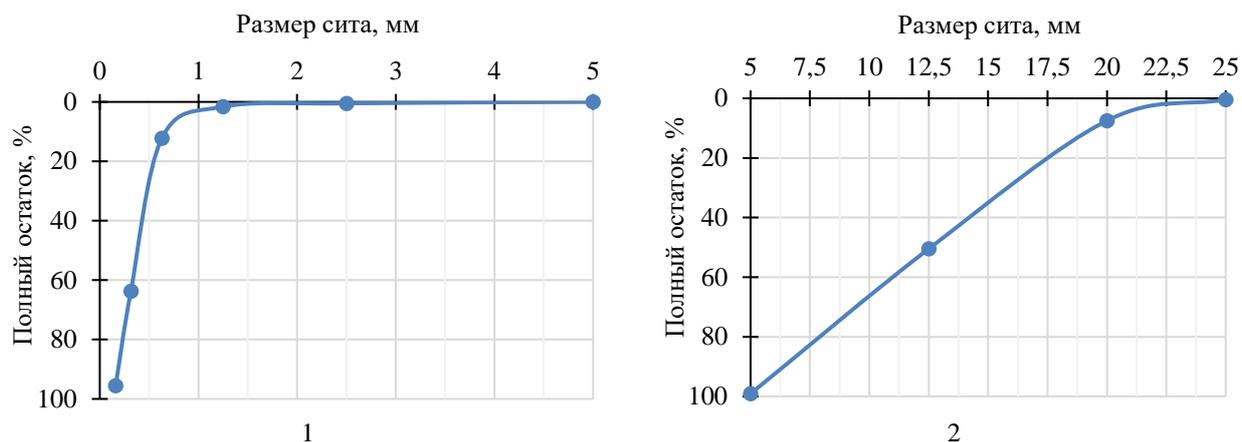
В качестве мелкого заполнителя применялся песок кварцевый производства ОАО «Архиповский карьер» (с. Архиповское, Краснодарский край, Россия). Основные свойства песка представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

#### Свойства песка Properties of sand

Модуль крупности	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Истинная плотность зёрен, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
1,74	0,24	2581	1461

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 фракцию от 5 до 20 мм (рис. 1.2), а модуль крупности кварцевого песка составлял 1,74 (рис. 1.1).

В качестве модифицирующей добавки, заменяющей часть цемента, применяли порошок из яичной скорлупы (ПЯС) (рис. 2).



**Рис. 2. Тонкомолотый порошок яичной скорлупы**

Fig. 2. Finely ground eggshell powder

Изготовление модифицирующей добавки из яичной скорлупы включало в себя следующие основные этапы:

- промывка скорлупы под проточной водой;
- сушка в сушильном шкафу при температуре 150°C; процесс высушивания длился до полного удаления влаги, содержащейся в скорлупе;
- высушенная скорлупа сначала измельчалась в ступке, затем осуществлялся дополнительный помол в шаровой планетарной мельнице «Активатор-4М» (ООО «Машиностроительный завод «Активатор», г. Новосибирск, Россия) в течение 4 часов на скорости 500 об/мин;
- измельчённые частицы яичной скорлупы просеивались через сито с размером ячеек 60 мкм, и часть частиц, прошедших через данное сито, применялась как модифицирующая добавка.

Дополнительно применялась пластифицирующая добавка на основе поликарбоксилата ПК1 (ГК «Полипласт», Москва, Россия).

С целью оценки влияния ПЯС на свойства бетонной смеси и бетона были разработаны составы, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

**Экспериментальные составы бетона**  
Experimental concrete compositions

Тип состава	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Вода, л/м <sup>3</sup>	Щебень, кг/м <sup>3</sup>	ПЯС		ПК1, кг/м <sup>3</sup>
					кг/м <sup>3</sup>	% вместо части цемента	
ПЯС0	383	791	194	1078	0	0	3,83
ПЯС5	363,9	791	194	1078	19,1	5	3,83
ПЯС10	344,7	791	194	1078	38,3	10	3,83
ПЯС15	325,6	791	194	1078	57,4	15	3,83
ПЯС20	306,4	791	194	1078	76,6	20	3,83

Изготовление экспериментальных образцов бетона, модифицированных ПЯС, осуществлялось следующим образом. Вначале все сырьевые компоненты дозировались в соответствии с рецептурой и загружались в лабораторный бетоносмеситель в последовательности: цемент, песок, ПЯС и вода с ПК1, где перемешивались до однородной консистенции. Потом вводился крупный заполнитель и снова осуществлялось перемешивание. Готовая бетонная смесь заливалась в формы-кубы, которые затем устанавливались на виброплощадку и уплотнялись в течение 60 секунд. Поверхность готовых образцов заглаживалась и выравнивалась. Через сутки образцы бетона извлекались из форм и помещались на хранение ещё в течение 27 суток в камеру нормального твердения. Всего было изготовлено 30 кубов размерами 100×100×100 мм.

Для определения влияния ПЯС на свойства бетонных смесей выполнялись измерения параметра удобоукладываемости по осадке конуса. Осадка смеси определялась по стандартной методике. Для проведения испытания применялись металлический конус, штыковка и ровный металлический лист. Перед испытанием всё оборудование протиралось влажной тканью, конус устанавливался на лист, и в него загружалась бетонная смесь в 3 этапа. За каждый этап смесью заполнялась 1/3 часть конуса и уплотнялась 25 ударами штыковки. После уплотнения убирались излишки смеси и осуществлялось поднятие конуса вверх в вертикальном направлении. Осадка конуса оценивалась как разность между высотой формы и высотой наивысшей точки осевшей бетонной смеси.

У бетона определялись такие свойства, как прочность на сжатие и водопоглощение. Прочность на сжатие определялась в соответствии с требованиями стандартной методики. Образцы-кубы устанавливались в лабораторную установку «П-50», нагрузка подавалась со скоростью нарастания 0,6 ± 0,2 МПа/с. Прочность на сжатие бетона вычислялась по формуле (1):

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \tag{1}$$

где  $F$  – разрушающая нагрузка, Н;  
 $A$  – площадь рабочего сечения образца, мм<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – коэффициент, учитывающий размеры образцов (для образцов со стороной 100 мм  $\alpha = 0,95$ ).

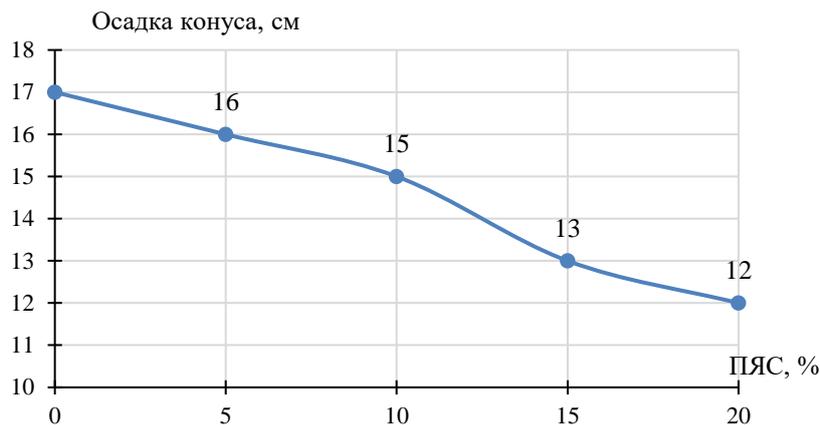
Определение водопоглощения модифицированных бетонов осуществлялось в соответствии с требованиями. Значение водопоглощения вычислялось по формуле (2):

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100, \tag{2}$$

где  $m_b$  – масса насыщенного водой образца, г;  
 $m_c$  – масса сухого образца, г.

**Результаты**

Результаты определения осадки конуса бетонных смесей, модифицированных ПЯС, представлены на рисунке 3.

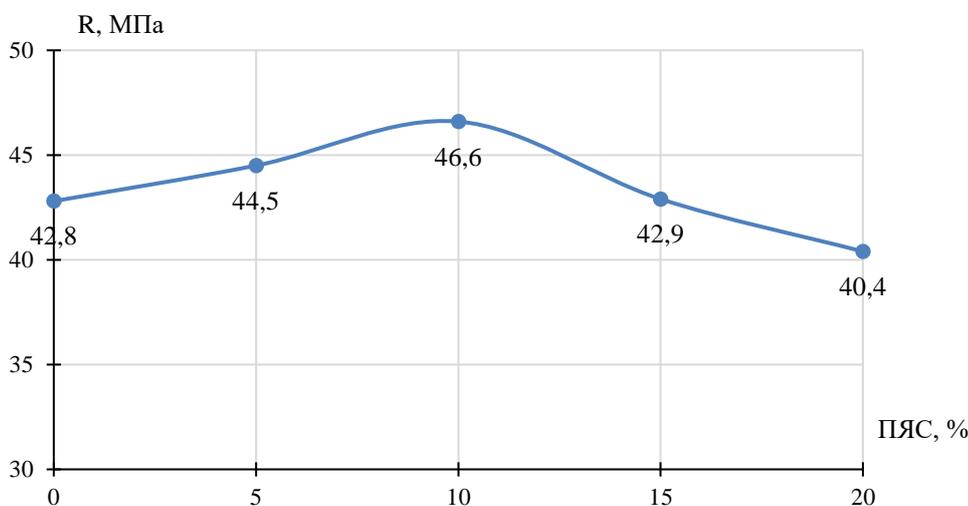


**Рис. 3. Осадка конуса бетонной смеси при различном содержании ПЯС**

**Fig. 3. Sedimentation of the cone of the concrete mixture with different content of eggshell powder**

Согласно результатам определения осадки конуса бетонных смесей, представленным на рисунке 3, видно, что с увеличением содержания ПЯС осадка бетонных смесей снижается. Так, при количестве ПЯС 5, 10, 15 и 20% значения осадки конуса смесей снизились на 5,9, 11,8, 23,5 и 29,4% соответственно. Снижение удобоукладываемости в первую очередь вызвано тем, что ПЯС поглощает в себя часть воды. Однако стоит отметить, что даже при 20% замены цемента на ПЯС бетонная смесь сохраняет необходимую удобоукладываемость и не расслаивается. Аналогичные результаты подтверждаются и рядом других исследований [19, 20].

Далее на рисунках 4 и 5 представлены результаты определения прочности на сжатие и водопоглощения бетонов с различным содержанием ПЯС.



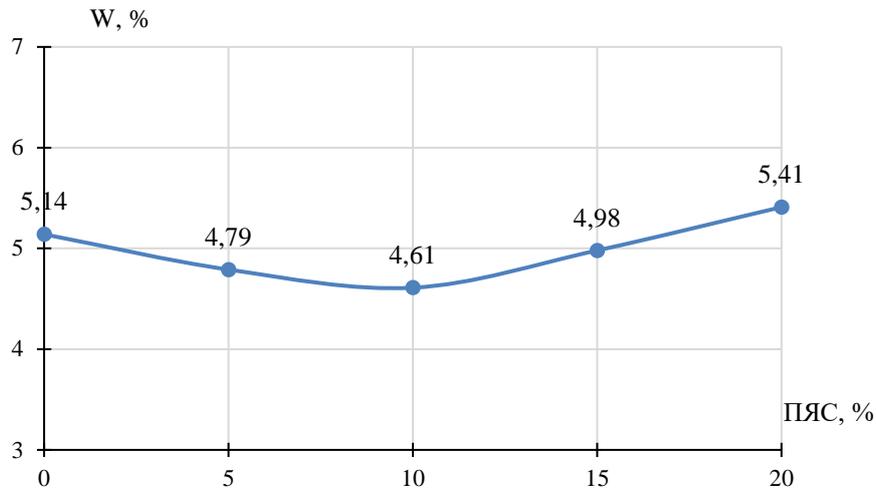
**Рис. 4. Прочность на сжатие бетона при различном содержании ПЯС**

**Fig. 4. Compressive strength of concrete at different contents of eggshell powder**

Из рисунка 4 видно, что прочность на сжатие бетона на отрезке 0–10% увеличивается. Пиковое значение прочности на сжатие 46,6 МПа приходится на отметку 10% ПЯС, прирост прочности на сжатие составляет 8,9% в сравнении с прочностью состава без ПЯС. С увеличением количества ПЯС более 10% наблюдается обратный эффект. При 15% ПЯС прочность на сжатие составляет 42,9 МПа, что примерно сопоставимо с прочностью контрольного состава, которая равна 42,8 МПа. При 20% ПЯС бетон имеет прочность на сжатие 40,4 МПа, что на 5,6% меньше контрольного состава.

Зависимость изменения водопоглощения от содержания ПЯС имеет следующий характер. На отметках 5% и 10% наблюдаются снижения значений водопоглощения, которые равны 4,79% и 4,61%, что, соответственно, на 6,8% и 10,3% меньше, чем у контрольного состава. При

увеличении содержания ПЯС водопоглощение начинает расти. Так, у бетонов с 15% и 20% содержанием ПЯС значения водопоглощения составили 4,98% и 5,41%. Водопоглощение последнего было на 5,3% выше, нежели у контрольного состава.



**Рис. 5. Водопоглощение бетона при различном содержании ПЯС**

Fig. 5. Water absorption of concrete with different contents of eggshell powder

Полученные результаты имеют хорошую сопоставимость с рядом зарубежных исследований. Например, замена части цемента 10% порошка яичной скорлупы позволила получить растворы с оптимальной прочностью на сжатие [21]. Введение 10% порошка яичной скорлупы обеспечило приросты прочности на сжатие и изгиб у бетонов [22].

Исходя из результатов экспериментальных исследований, можно резюмировать следующее. Замена части цемента порошком яичной скорлупы в количестве 10% является наиболее оптимальной и позволяет получить бетонный композит с улучшенными свойствами. Добавление ПЯС в количестве 15 и 20% также можно назвать эффективным, так как бетон имеет приемлемые прочностные свойства, сопоставимые с бетоном контрольного состава [23–25]. Положительный эффект от модификации бетона ПЯС связан с тем, что данная добавка улучшает межфазные взаимодействия между различными составляющими бетона. ПЯС в основном состоит из кальция, который при добавлении к цементной системе интенсивно реагирует с цементом, образуя более крупную сеть минералов гидрата силиката кальция [26–28]. Увеличение количества гелей гидрата силиката кальция положительно влияет на структуру затвердевшего бетонного композита, делая её более плотной и прочной. Сниженная удобоукладываемость смесей объясняется повышенным содержанием известняка, который поглощает все молекулы свободной воды путём абсорбции [29, 30].

## Выводы

Исследованы свойства бетонных смесей и бетонов, модифицированных порошком яичной скорлупы. Определено оптимальное количество замены части цемента порошком яичной скорлупы.

1. Введение порошка яичной скорлупы вместо части цемента снижает осадку бетонных смесей. Зависимость снижения осадки бетонной смеси от количества ПЯС носит прямой характер. Минимальное значение осадки конуса зафиксировано при содержании ПЯС в количестве 20% и составило 12,4 см, что на 29,4% меньше осадки контрольной смеси.

2. Оптимальное количество ПЯС составило 10% и позволило получить бетон с максимальным значением прочности на сжатие и минимальным водопоглощением. Прирост прочности на сжатие составил 8,9%. Водопоглощение снизилось на 10,3%.

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

## ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.Л. Маилян – окончательная редакция статьи, её согласование со всеми авторами; Д.О. Бахареv – 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. Гранева А.В., Лушин К.И., Пуляев И.С., Кудрявцева В.Д. Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16, № 1. С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>.
2. Плотникова С.В. Оценка выбросов CO<sub>2</sub> традиционными и инновационными ограждающими стеновыми конструкциями в течение их жизненного цикла // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 1(45). С. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.21869/2311-1518-2024-45-1-83-97>.
3. Халюшев А.К., Щербань Е.М., Стельмах С.А., Нажуев М.П., Семенихина А.А., Воробьёв Г.А. Твердение цементных паст на основе поверхностно-модифицированных дисперсных минеральных компонентов // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN220.pdf>
4. Алипур М., Окольникова Г.Э. Перспективы применения высокопрочного бетона с использованием сельскохозяйственных отходов // Системные технологии. 2023. № 2(47). С. 146–154. DOI: [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_2\\_146](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_2_146).
5. Джусупова М.А., Талантбек К.А. Исследование структуры золы из рисовой шелухи и ее влияние на прочностные свойства мелкозернистого бетона // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2024. № 2(70). С. 527–531. DOI: <https://doi.org/10.56634/16948335.2024.2.527-531>.
6. Алипур М., Окольникова Г.Э. Морозостойкость модифицированного высокопрочного бетона на основе промышленных и аграрных отходов // Инновации и инвестиции. 2024. № 6. С. 554–558.
7. Алипур М., Окольникова Г.Э. Влияние купершлака и золы рисовой шелухи на прочность железобетонных балок по нормальному сечению // Экономика строительства. 2024. № 6. С. 231–236.
8. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Паскачев А.Б., Ржевская Т.Г., Маилян Л.Д., Развеева И.Ф., Погребняк А.А. Опыт применения сельскохозяйственных отходов в бетонах для экологических конструкций, зданий и сооружений // Цемент и его применение. 2023. № 5. С. 52–54.
9. Кеневаи Э., Содомин М. Получение лёгких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли, рисовой шелухи // Экономика строительства. 2024. № 4. С. 327–333.
10. Бакатович А.А., Чжан И., Гаспар Ф. Изоляционные композиты на основе смеси рисовой лузги и соломы // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2022. № 14. С. 2–9. DOI: <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-32-14-2-9>.
11. Сяньпэн В., Леонович С.Н. Экспериментальное исследование прочности переработанного бетона с 2 % кокосового волокна // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 3(155). С. 84–93.
12. de Freitas J.J.G., Vieira C.M.F., Natalli J.F., Lavander H.D., de Azevedo A.R.G., Marvila M.T. Cleaner production of cementitious materials containing bioaggregates based on mussel shells: A review // Sustainability [Internet]. 2024. Vol. 16. P. 5577. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16135577>.

13. Zhu Y., Chen D., Yu X., Liu R., Liao Y. Properties of cementitious materials utilizing seashells as aggregate or cement: prospects and challenges // *Materials* [Internet]. 2024. Vol. 17. P. 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17051222>.
14. El Mendili Y., Benzaama M.-H. Investigation of mechanical and thermal performance of concrete with scallop shells as partial cement replacement: alternative binder and life cycle assessment // *Civ. Eng.* 2022, Vol. 3, № 3. P. 760–778. DOI: <https://doi.org/10.3390/civileng3030044>.
15. Kim M.O., Lee M.K. Strength and microstructural changes in cementitious composites containing waste oyster shell powder // *Buildings* [Internet]. 2023. Vol. 13, № 12. P. 3078. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13123078>.
16. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Beskopylny N., Dotsenko N., Kotenko M. Nanomodified concrete with enhanced characteristics based on river snail shell powder // *Applied Sciences* [Internet]. 2022. Vol. 12, № 15. P. 7839. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157839>.
17. Левицкая К.М., Кикалишвили Д.Г., Чуриков А.С. Применение яичной скорлупы в строительном материаловедении // *Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XIV Международного молодёжного форума*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2022. С. 47–52.
18. Потапов И.И., Захарова М.М. Обзор современных технологий утилизации отходов. Опыт зарубежных стран // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2023. № 6. С. 142–173. DOI: <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2023-06-9>.
19. Othman R., Chong B.W., Jaya R.P., Mohd Hasan M.R., Abdullah M.M.A.B., Wan Ibrahim M.H. Evaluation on the rheological and mechanical properties of concrete incorporating eggshell with tire powder // *J. Mater. Res. Tech.* 2021. Vol. 14. P. 439–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.078>.
20. Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Юрова В.С. Природа минеральных наполнителей и подвижность бетонной смеси // *Региональная архитектура и строительство*. 2021. № 4(49). С. 30–35. DOI: [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2021\\_4\\_36](https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_36).
21. Nandhini K., Karthikeyan J. Effective utilization of waste eggshell powder in cement mortar // *Constr. Mater. Today: Proc.* 2021. [In Press]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.328>.
22. Al Abri S.A.S., Rollakanti C.R., Poloju K.K.; Joe A. Experimental study on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with eggshell powder for sustainable // *Constr. Mater. Today: Proc.* 2022. [In Press]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.708>.
23. Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ // *Региональная архитектура и строительство*. 2024. № 1(58). С. 47–58. DOI: [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2024\\_1\\_47](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47).
24. Шошин Е.А., Бабаджанян А.А., Гливленко И.А., Ковалев Д.А. Влияние длительности механохимического синтеза на структурно-морфологические характеристики силикат-кальциевой дисперсии // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024. № 1. С. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-9-1-67-77>.
25. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Шулдяков К.В. Влияние известняка в цементе на структуру и модуль упругости тяжёлого бетона // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2024. Т. 24, № 1. С. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.14529/build240106>.
26. Баженов Ю.М., Федюк Р.С., Лесовик В.С. Обзор современных высокоэффективных бетонов // *Научно-практические технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвящённой 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. С. 45–49.
27. Pankov P., Bepolitov D., Shavanov N., Konovalova N., Ushkova M., Karabtsov A., Tarasenko I., Petukhov V., Panarin I., Zayakhanov M., Bituev A. Structural forming of soil composites using as a pavement subgrade strengthening // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02847>.
28. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. Экономическая перспектива переработки золошлаковых отходов пылеугольных электрических станций Дальневосточного региона // *Вестник Дальневосточного государственного технического университета*. 2010. № 3 (5). С. 61–80.

29. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Varavka V., Beskopylny N., El'shaeva D. Enhanced eco-friendly concrete nano-change with eggshell powder // *Appl. Sci.* 2022. Vol.12. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136606>.
30. Razali Nadia, Azizan M.A., Pa'ee K.F., Razali Nadlene, Jumadi N. Preliminary studies on calcinated chicken eggshells as fine aggregates replacement in conventional concrete // *Mater. Today Proc.* 2020. Vol. 31. 354–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.232>.

## REFERENCES

1. Graneva A.V., Lushin K.I., Pulyaev I.S., Kudryavtseva V.D. Closed-loop economy in the processing of concrete and reinforced concrete waste. *Nanotechnologies in Construction: Scientific Online Journal*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>.
2. Plotnikova S.V. Assessment of CO2 emissions by traditional and innovative enclosing wall structures during their life cycle. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*, 2024, no. 1(45), pp. 83–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21869/2311-1518-2024-45-1-83-97>.
3. Khalyushev A.K., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Nazhnev M.P., Semenikhina A.A., Vorob'ev G.A. Hardening of cement pastes based on surface modified dispersed mineral components. *The Eurasian Scientific Journal* [Internet], 2020, vol. 2(12). (In Russ.). URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN220.pdf>.
4. Alipur M., Okolnikova G.E. Prospects for the application of high-strength concrete using agricultural waste. *System Technologies*, 2023, no. 2(47), pp. 146–154. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_2\\_146](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_2_146).
5. Dzhusupova M.A., Talantbek K.A. Study of the structure of rice husk ash and its influence on the strength properties of fine-grained concrete. *Bulletin of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2024, no. 2(70), pp. 527–531. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.56634/16948335.2024.2.527-531>.
6. Alipur M., Okolnikova G.E. Frost resistance of modified high-strength concrete based on industrial and agricultural waste. *Innovations and Investments*, 2024, no. 6, pp. 554–558. (In Russ.).
7. Alipur M., Okolnikova G.E. Influence of copper slag and rice husk ash on the strength of reinforced concrete beams along a normal section. *Construction Economics*, 2024, no. 6, pp. 231–236. (In Russ.).
8. Stelmakh S.A., Shcherban E.M., Paskachev A.B., Rzhetskaya T.G., Mailyan L.D., Razveeva I.F., Pogrebnyak A.A. Experience of using agricultural wastes in concretes for green buildings and structures. *Journal Cement and its Applications*, 2023, no 5, pp. 52–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.61907/cia.2023.35.51.001>.
9. Kenevei E., Sodomini M. Production of lightweight concrete (arbolite) using secondary raw materials based on cotton, hemp, and rice husks. *Construction Economics*, 2024, no. 4, pp. 327–333. (In Russ.).
10. Bakatovich A.A., Zhang I., Gaspar F. Insulating composites based on a mixture of rice husk and straw. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences*, 2022, no. 14, pp. 2–9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-32-14-2-9>.
11. Xianpeng W., Leonovich S.N. Experimental study of the strength of recycled concrete with 2 % coconut fiber. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2022, no. 3(155), pp. 84–93. (In Russ.).
12. de Freitas J.J.G., Vieira C.M.F., Natalli J.F., Lavander H.D., de Azevedo A.R.G., Marvila M.T. Cleaner production of cementitious materials containing bioaggregates based on mussel shells: A review. *Sustainability* [Internet], 2024, vol. 16, p. 5577. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16135577>.
13. Zhu Y., Chen D., Yu X., Liu R., Liao Y. Properties of cementitious materials utilizing seashells as aggregate or cement: prospects and challenges. *Materials* [Internet], 2024, vol. 17, p. 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17051222>.
14. El Mendili Y., Benzaama M.-H. Investigation of mechanical and thermal performance of concrete with scallop shells as partial cement replacement: alternative binder and life cycle assessment. *Civ. Eng.*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 760–778. DOI: <https://doi.org/10.3390/civileng3030044>.
15. Kim M.O., Lee M.K. Strength and microstructural changes in cementitious composites containing waste oyster shell powder. *Buildings* [Internet], 2023, vol. 13, no. 12, p. 3078. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13123078>.
16. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Beskopylny N., Dotsenko N., Kotenko M. Nanomodified concrete with enhanced characteristics based on river snail

- shell powder. *Applied Sciences* [Internet], 2022, vol. 12, no. 15, p. 7839. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157839>.
17. Levitskaya K.M., Kikalishvili D.G., Churikov A.S. Application of eggshell in construction materials science. *Education. Science. Production: Collection of reports of the XIV International Youth Forum*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2022. P. 47–52. (In Russ.).
  18. Potapov I.I., Zakharova M.M. Review of modern waste disposal technologies. Experience of foreign countries. *Problems of the Environment and Natural Resources*, 2023, no. 6, pp. 142–173. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2023-06-9>.
  19. Othman R., Chong B.W., Jaya R.P., Mohd Hasan M.R., Abdullah M.M.A.B., Wan Ibrahim M.H. Evaluation of the rheological and mechanical properties of concrete incorporating eggshell with tire powder. *J. Mater. Res. Tech.*, 2021, vol. 14, pp. 439–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.078>.
  20. Belyakova E.A., Moskvina R.N., Yurova V.S. The nature of mineral fillers and the workability of concrete mix. *Regional Architecture and Construction*, 2021, no. 4(49), pp. 30–35. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2021\\_4\\_36](https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_36).
  21. Nandhini K., Karthikeyan J. Effective utilization of waste eggshell powder in cement mortar. *Constr. Mater. Today: Proc.*, 2021. [In Press]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.328>.
  22. Al Abri S.A.S., Rollakanti C.R., Poloju K.K.; Joe A. Experimental study on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with eggshell powder for sustainable. *Constr. Mater. Today: Proc.*, 2022. [In Press]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.708>.
  23. Tarakanov O.V., Ivaschenko Yu.G., Erofeeva I.V. Influence of carbonate mineral additives on the formation of microstructure and strength of mineral binders. *Regional Architecture and Construction*, 2024, no. 1(58), pp. 47–58. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2024\\_1\\_47](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47).
  24. Shoshin E.A., Babadzhanyan A.A., Glivenko I.A., Kovalev D.A. Influence of the duration of mechanochemical synthesis on the structural and morphological characteristics of calcium silicate dispersion. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2024, no. 1, pp. 67–77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-9-1-67-77>.
  25. Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V., Shuldyakov K.V. Influence of limestone in cement on the structure and modulus of elasticity of heavy concrete. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 40–49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14529/build240106>.
  26. Bazhenov Y.M., Fedyuk R.S., Lesovik V.S. Review of modern high-performance concretes. *High-tech Technologies and Innovations*. Electronic collection of reports of the International scientific and practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. P. 45–49. (In Russ.).
  27. Pankov P., Bespolitov D., Shavanov N., Konovalova N., Ushkova M., Karabtsov A., Tarasenko I., Petukhov V., Panarin I., Zayakhanov M., Bituev A. Structural forming of soil composites using as a pavement subgrade strengthening. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, vol. 20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02847>.
  28. Alekseko L.N., Taskin A.V. The economic perspective of the processing of ash and slag waste from pulverized coal power plants in the Far Eastern region. *Bulletin of the Far Eastern State Technical University*, 2010, no. 3(5), pp. 61–80. (In Russ.).
  29. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Varavka V., Beskopylny N., El'shaeva D. Enhanced eco-friendly concrete nano-change with eggshell powder. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136606>.
  30. Razali Nadia, Azizan M.A., Pa'ee K.F., Razali Nadlene, Jumadi N. Preliminary studies on calcinated chicken eggshells as fine aggregates replacement in conventional concrete. *Mater. Today Proc.*, 2020, vol. 31, pp. 354–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.232>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Никора Надежда Игоревна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений», Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ nikorani@mail.ru

**Nadezhda I. Nikora**, Candidate of Engineering 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 государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)  
✉ mailyan\_a@sroufo.ru

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

**Рыженкова Дарья Юрьевна** – студент, Донской государственной технической 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 государственной технической 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 государственной технической 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 государственной технической 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 государственной технической 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: 24.09.2025.