



Сравнение эффективности модификации микрокремнеземом облегченных бетонов на крупных заполнителях из различных горных пород

А.Б. Паскачев¹, Т.Г. Ржевская², С.А. Стельмах^{3✉},
Е.М. Щербань⁴, Л.Д. Маилян⁵, А.Л. Маилян⁶

¹Институт миграции и межнациональных отношений, г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский центр «Строительство», г. Москва, Россия

^{3,4,5,6}Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Перспективным направлением в строительной науке и практике является создание облегченных бетонов, характеризующихся так называемым коэффициентом конструктивного качества, т.е. относительной характеристикой между прочностью и весом получаемых бетонов. Данный коэффициент одновременно отражает максимально возможное снижение веса конструкции и ее эксплуатационную надежность. Целью исследования является сравнение эффективности модификации микрокремнеземом облегченных бетонов, полученных с помощью крупных заполнителей из различных горных пород. В исследовании проведен анализ существующей научной литературной базы по облегченным бетонам, их рецептуре, технологии и научной обоснованности, структурной совместимости применяемых компонентов. Проведено сравнение эффективности модификации облегченных бетонов при различных рецептурно-технологических параметрах. Прочность модифицированного облегченного бетона и его коэффициент конструктивного качества существенно изменялись в сравнении с немодифицированным облегченным бетоном. Наибольший эффект достигается при использовании облегченного бетона на гранитном щебне, модифицированного микрокремнеземом в количестве 9 %. В результате максимальная прочность на сжатие составила 55,9 МПа, а коэффициент структурного качества – $24,3 \cdot 10^{-3}$ МПа·м³/кг по сравнению с другими изученными составами бетона. Увеличение прочности на сжатие составило 17,2 % по сравнению с немодифицированным облегченным бетоном, а коэффициент конструктивного качества увеличился на 19,1 % по сравнению с немодифицированным бетоном на крупном плотном заполнителе.

Ключевые слова: облегченный бетон, крупный плотный заполнитель для бетона, пористый заполнитель для бетона, плотность бетона, прочность на сжатие бетона, коэффициент конструктивного качества бетона

Для цитирования: Паскачев А.Б., Ржевская Т.Г., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Маилян Л.Д., Маилян А.Л. Сравнение эффективности модификации микрокремнеземом облегченных бетонов на крупных заполнителях из различных горных пород // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 1. С. 82–95. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-82-95>. EDN: JURMHA.

Original article

Comparison of the effectiveness of microsilica modification of lightweight concretes with coarse aggregates from various rocks

Aslambek B. Paskachev¹, Tat'yana G. Rzhetskaya², Sergei A. Stel'makh^{3✉},
Evgenii M. Shcherban'⁴, Liya D. Mailyan⁵, Aleksandr L. Mailyan⁶

¹Institute of Migration and Interethnic Relations", Moscow, Russia

²Research Center "Construction", Moscow, Russia

^{3,4,5,6}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. A promising line of research in construction science and practice is the creation of lightweight concretes. They exhibit the so-called strength-density ratio, i. e. a relative characteristic between the strength and weight of the resulting concrete. This ratio simultaneously reflects the maximum possible weight reduction of the structure and its operational reliability. The research aims to compare the effectiveness of microsilica modification of lightweight concretes produced with coarse aggregates from various rocks. The study analyzed the existing scientific literature on lightweight concretes, their formulations, technology, and scientific validity, as well as the structural compatibility of the components used. A comparison was made of the effectiveness of lightweight concrete modification for various formulation technological parameters. The strength of modified lightweight concrete and its strength-density ratio changed significantly compared to unmodified lightweight concrete. The strongest effect is achieved when using lightweight granite concrete modified with 9 % of microsilica. As a result, the maximum compressive strength was 55.9 MPa, and the strength-density ratio was $24.3 \cdot 10^{-3}$ MPa·m³/kg compared to other studied concrete compositions. The increase in compressive strength was 17.2 % compared to unmodified lightweight concrete. The strength-density ratio increased by 19.1 % compared to unmodified coarse dense aggregate concrete.

Keywords: lightweight concrete, coarse dense aggregate for concrete, porous aggregate for concrete, density of concrete, compressive strength of concrete, structural quality factor of concrete

For citation: Paskachev A.B., Rzhevskaya T.G., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.D., Mailyan A.L. Comparison of the effectiveness of microsilica modification of lightweight concretes with coarse aggregates from various rocks. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(1):82-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-82-95>. EDN: JURMHA.

ВВЕДЕНИЕ

Сложные условия инженерного строительства, такие как инженерно-геологические проблемы, плотность городской застройки, необходимость возведения зданий нового поколения в районах с более старой инфраструктурой и по соседству со зданиями, возведенными значительное время назад, диктует необходимость к пересмотру строительно-производственной базы по возведению зданий, сооружений и жилых производственных районов [1]. Следует понимать, что совершенствование производственно-строительной базы заключается не только в обновлении оборудования, внедрении новых инновационных технологий, основанных в первую очередь на цифровизации и автоматизации, но и, безусловно, в необходимости пересмотра материальной базы для строительства, а также конструктивных и технологических решениях [2, 3]. В части материальной базы строительства следует понимать принципиально новый подход к применяемым материалам, изделиям и конструкциям, что во многом обуславливает разработку новых рецептурно-технологических решений для создания строительных объектов [4, 5]. В этой связи важнейшим направлением современной строительной науки и инженерии является создание материалов, позволяющих получать объекты с наименьшей ресурсо-, трудо- и материалоемкостью [1]. Строительные композиты, в первую очередь бетоны, предназначены для решения этой проблемы, хотя

проблемы зачастую являются комплексными. Необходимо не только создавать новые материалы, изделия и конструкции с улучшенными характеристиками, но и добиваться иных их эксплуатационных качеств, например, снижения площади рабочих сечений, получения наиболее энергоэффективных и энергосберегающих зданий и сооружений. Здесь на первый план выходит рецептура исходных изделий [6–8]. Перспективным направлением в строительной науке и практике является создание облегченных бетонов, обладающих рядом характеристик, важнейшей из которых является так называемый коэффициент конструктивного качества, т.е. относительная характеристика между прочностными и плотностными свойствами создаваемых бетонов [6, 7, 9]. Данный коэффициент как нельзя лучше характеризует одновременно максимально возможное снижение веса конструкции, т.е. показатель ее универсальности, и ее эксплуатационную надежность, т.е. показатель, выражающийся в прочностных приростах или сохранении их на уровне, сопоставимом с тяжелыми бетонами [7]. Рецептура облегченных бетонов играет особую роль в технологическом процессе и имеет ряд специфических сложностей и особенностей. Такие особенности во многом обусловлены слабой степенью изученности применимости различных модифицирующих добавок в бетоны и их сочетаемости с другими компонентами получаемого облегченного бетона [10, 11–13]. Такой научный дефицит и опреде-

лил цель настоящего исследования. Цель исследования – аналитическое и экспериментальное сравнение эффективности модификации микрокремнеземом облегченных бетонов, полученных с помощью крупных заполнителей из различных горных пород. Задачами исследования будут: анализ существующей научной литературной базы по облегченным бетонам, их рецептуре, технологии и научной обоснованности, структурной совместимости применяемых компонентов; проведение масштабных экспериментальных исследований по изучению влияния рецептурно-технологических факторов при модификации микрокремнеземом облегченных бетонов на их эксплуатационные характеристики; сравнение эффективности такой модификации при различных исходных рецептурно-технологических параметрах, обусловивших разницу в приростах показателей эффективности и, в первую очередь, плотности,

прочности, коэффициента конструктивного качества.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании были использованы следующие исходные материалы:

- вяжущее: портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108-2020¹ (г. Старый Оскол);
 - мелкий заполнитель: кварцевый песок ГОСТ 8736-2014² (Ростовская область);
 - крупный заполнитель: щебень гранитный (Воронежская область); щебень из песчаника и известняковый щебень (Ростовская область) ГОСТ 8267-93³; керамзитовый гравий (Тульская область) ГОСТ 32496-2013⁴ (все виды крупного заполнителя из смеси фракций 5–20 мм);
 - микрокремнезем МК-85 (Липецкая область), диапазон размеров частиц 2–300 мкм.
- Свойства исходных компонентов бетона приведены в табл. 1–4.

Таблица 1. Характеристики бездобавочного портландцемента

Table 1. Characteristics of additive-free Portland cement

Характеристика	Значение
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 2 сут.	26,3
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 28 сут.	56,5
Начало схватывания, мин	85
Равномерность изменения объема (расширение), мм	0

Таблица 2. Характеристики мелкого заполнителя (песка)

Table 2. Characteristics of fine aggregate (sand)

Характеристика	Значение
Класс, группа, модуль крупности	I, средний, 2,42
Насыпная плотность, кг/м ³	1390
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,9
Содержание глины в комках, %	0

Таблица 3. Характеристики щебня гранитного (Г), из песчаника (П), известнякового (И) и керамзитового гравия (К)

Table 3. Characteristics of crushed granite (G), sandstone (P), limestone (I) and expanded clay gravel (K)

Характеристика	Значение			
	Г	П	И	К
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	7,3	8,5	8,8	–
Марка по прочности	Др1200	Др1000	Др800	П200
Насыпная плотность, кг/м ³	1383	1375	1369	650
Марка по морозостойкости	F200	F150	F100	F25
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0	0,2	0,5	–
Содержание глины в комках, %	0	0	0	–
Водопоглощение, %	0,65	1,03	2,41	18,4

¹ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.

²ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

³ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 13 с.

⁴ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 10 с.

Составы бетонных смесей, разработанные для исследования, представлены в табл. 5.

Во всех составах облегченного бетона дозировка керамзитового гравия составляла 20% от объема крупного заполнителя, ранее подобранная в работе [14].

План экспериментальных исследований представлен на рис. 1.

Для определения плотности и прочности

на сжатие было заформовано 9 образцов кубов из тяжелого бетона (без керамзита и микрокремнезема) – по 3 образца для каждого вида крупного плотного заполнителя.

Также было изготовлено 63 образца-куба облегченного бетона (с керамзитом и различной дозировкой микрокремнезема от 0 % до 18 %) – по 21 образцу для каждого вида крупного плотного заполнителя.

Таблица 4. Химический состав модификатора (микрокремнезема)

Table 4. Chemical composition of the modifier (silica)

Вид оксида	Количество, %	Вид оксида	Количество, %
SiO ₂	90,403	Cl	0,235
Fe ₂ O ₃	2,717	MnO	0,138
K ₂ O	1,998	P ₂ O ₅	0,115
Al ₂ O ₃	1,101	ZnO	0,029
Na ₂ O	1,004	NiO	0,009
CaO	0,987	CuO	0,007
MgO	0,643	Cr ₂ O ₃	0,001
SO ₃	0,613	—	—

Таблица 5. Составы бетонных смесей

Table 5. Compositions of concrete mixtures

Маркировка смеси	Количество компонентов на 1 м ³ бетонной смеси					
	Цемент, кг/м ³	Вода, кг/м ³	Щебень (И/П/Г), кг/м ³	Керамзит, кг/м ³	Песок, кг/м ³	МК, кг/м ³
ОМК–И/П/Г	388	219	1030	0	782	0
ОМК–И+К/П+К/Г+К	388	219	932	98	782	0
ЗМК–И+К/П+К/Г+К	376,4	219	932	98	782	11,6
6МК–И+К/П+К/Г+К	364,7	219	932	98	782	23,3
9МК–И+К/П+К/Г+К	353,1	219	932	98	782	34,9
12МК–И+К/П+К/Г+К	341,4	219	932	98	782	46,6
15МК–И/П/Г	329,8	219	932	98	782	58,2
18МК–И/П/Г	318,2	219	932	98	782	69,8

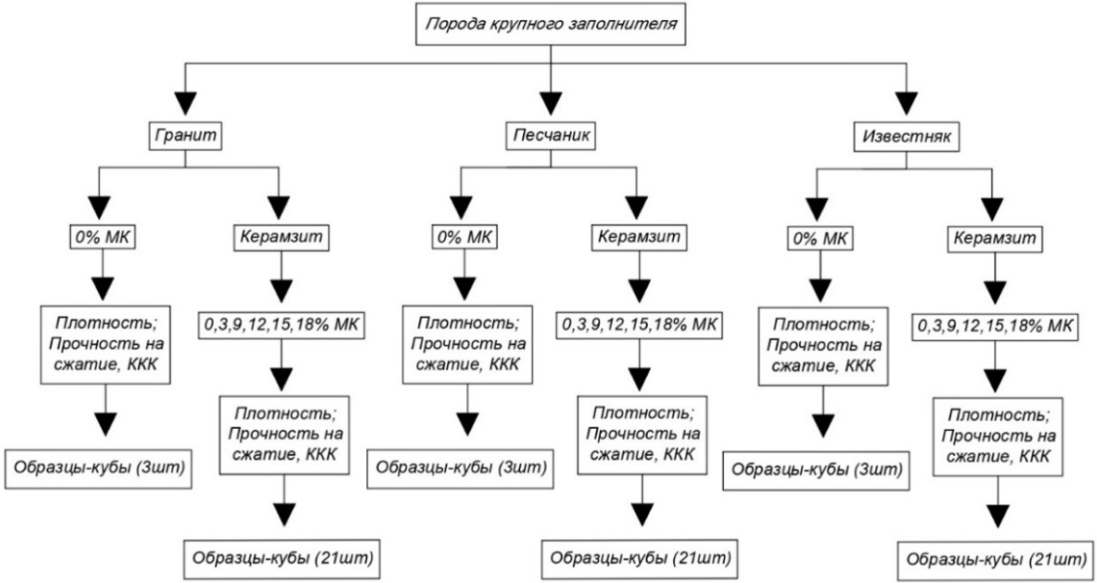


Рис. 1. Программа экспериментальных исследований

Fig. 1. Experimental research program

Всего было изготовлено 72 образца-куба. Плотность бетона определяли по ГОСТ 12730.1-2020⁵. Прочность на сжатие бетона определяли по ГОСТ 10180-2012⁶. Коэффициент конструктивного качества (ККК) бетона определяли по формуле

$$KKK = \frac{R}{\rho},$$

где R – прочность на сжатие, МПа;

ρ – плотность, кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-механические характеристики образцов облегченного бетона всех экспериментальных составов и их графические зависимости от параметров рецептуры приведены в табл. 6 и 7 и на рис. 2 и 3.

Значения плотности образцов бетона подобранных составов представлены в табл. 6 и на рис. 2.

Таблица 6. Плотность образцов облегченного бетона (кг/м³) на крупном заполнителе из различных горных пород, модифицированного микрокремнеземом

Table 6. Density of samples of lightweight concrete (kg/m³) on a large aggregate of various rocks modified with silica

Порода и состав щебня	Содержание микрокремнезема, %						
	0	3	6	9	12	15	18
Г+К / Г	2465/ 2278	2291	2296	2304	2301	2288	2267
П+К / П	2378/ 2197	2205	2211	2215	2208	2202	2190
И+К / И	2262/ 2063	2069	2073	2075	2072	2065	2058

Примечание: через дробь – плотность бетона на крупном плотном заполнителе / плотность облегченного бетона на смешанном заполнителе.

Таблица 7. Прочность на сжатие облегченного бетона (МПа) на крупном заполнителе из различных горных пород, модифицированного микрокремнеземом

Table 7. Compressive strength of lightweight concrete (MPa) on a large aggregate of various rocks modified with silica

Порода и состав щебня	Количество микрокремнезема, %						
	0	3	6	9	12	15	18
Г+К / Г	50,4/47,7	49,2	51,6	55,9	53,2	48,7	46,3
П+К / П	47,7/44,9	46,2	47,8	51,7	49,3	45,8	43,2
И+К / И	43,4/40,1	41,4	42,6	45,2	43,6	41,1	38,5

Примечание: через дробь прочность на сжатие бетона на крупном плотном заполнителе / прочность на сжатие облегченного бетона на смешанном заполнителе.

Из данных табл. 6 и зависимостей (рис. 2) можно сделать вывод, что плотность облегченного бетона логично снижается при замене 20 % крупного плотного заполнителя на пористый. При этом при добавлении в облегченный бетон микрокремнезема плотность несколько увеличивается вплоть до 9 %, затем снижается при количестве микрокремнезема 9–18 %, что характерно для всех бетонов независимо от вида заполнителя. Значения прочности на сжатие образцов бетона подобранных составов представлены в табл. 7 и на рис. 3. Анализ данных, представленных на рис. 3, позволяет сделать вывод о том, что

прочность облегченного бетона повышается при увеличении количества микрокремнезема на 0–9 %, в точке 9% наблюдается пик, и далее – чуть более резкое снижение прочности в сравнении с ее подъемом. Таким образом, максимальную прочность имели облегченные бетоны, содержащие 9 % микрокремнезема. Данные результаты характерны для бетонов независимо от вида крупного заполнителя с преимуществом в прочности бетона на гранитном щебне по сравнению с бетоном на щебне из песчаника и тем более на щебне из известняка. При этом прочность модифицированного облегченного бетона падает ниже

⁵ГОСТ 12730.1-2020. Методы определения плотности. М.: Стандартиформ, 2021. 8 с.

⁶ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартиформ, 2018. 32 с.

прочности немодифицированного облегченного бетона только при дозировках микрокремнезема более 15 %. Микрокремнезем обеспечивает более плотную упаковку частиц, а также способствует дополнительному образованию гидрата силиката кальция.

Следовательно, большее количество гид-

рата силиката кальция способствует более плотной упаковке частиц инертных компонентов, а также более быстрому затвердеванию бетона и, соответственно, более высоким значениям прочности на сжатие [15–19]. Далее объединим результаты по плотности и прочности на сжатие бетонов.

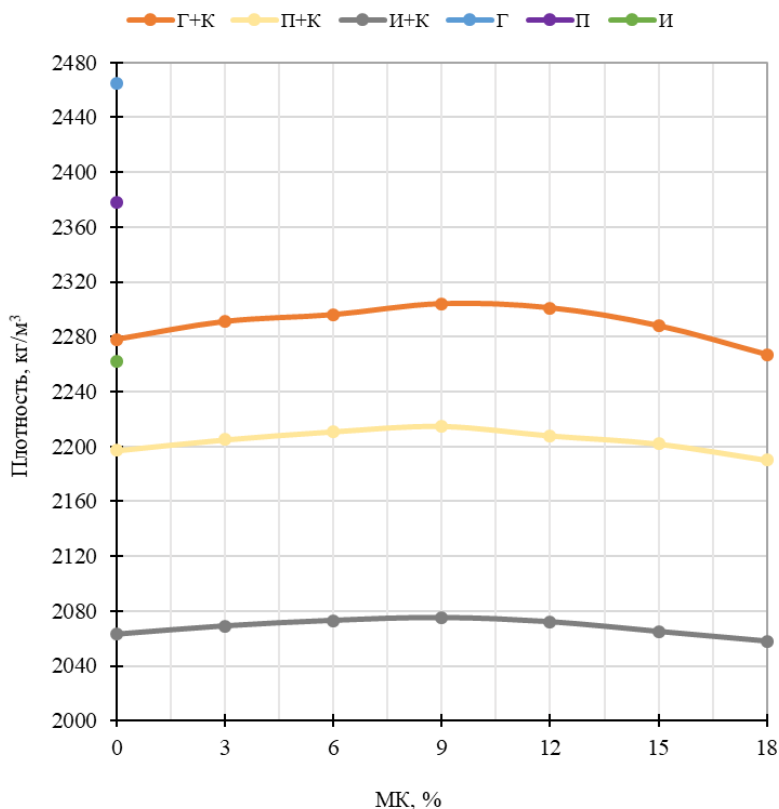


Рис. 2. Плотность облегченного бетона на различных видах крупного заполнителя в зависимости от количества микрокремнезема
Fig. 2. The density of lightweight concrete on various types of coarse aggregate, depending on the amount of silica

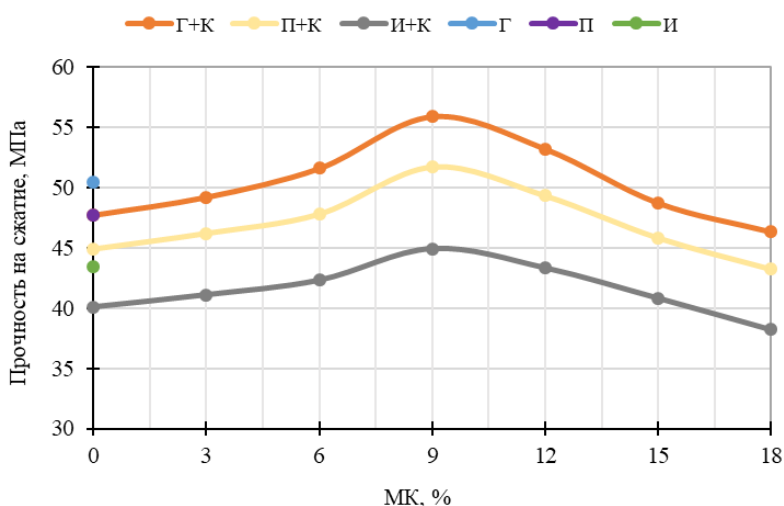


Рис. 3. Прочность на сжатие облегченного бетона на различных видах крупного заполнителя в зависимости от количества микрокремнезема
Fig. 3. Compressive strength of lightweight concrete on various types of coarse aggregate depending on the amount of microsilicon

В табл. 8 и на рис. 4 представлены зависимости комплексного показателя – коэффициента конструктивного качества, характеризующего отношение прочности материала к его плотности. Результаты, отраженные в графических зависимостях на рис. 4, демонстрируют эффективность облегченного бетона в сравнении с традиционным бетоном по соотношению прочности и плотности.

Применение микрокремнезема в подобранной дозировке 9 % еще больше увеличивает данную эффективность облегченного

бетона, который демонстрирует максимальное значение ККК – $24,3 \cdot 10^{-3}$ МПа·м³/кг. По данному показателю все облегченные модифицированные бетоны на каждом рассматриваемом виде заполнителя ведут себя лучше, нежели без модификации.

Таким образом, коэффициент конструктивного качества увеличился за счет значительного увеличения прочности, при этом масса конструкций практически не изменилась от введения модифицирующей добавки.

Таблица 8. Коэффициент конструктивного качества бетона (10^{-3} МПа·см³/г) на крупном заполнителе из различных горных пород, модифицированного микрокремнеземом
Table 8. Coefficient of structural quality of concrete (10^{-3} МПа см³/g) on a large aggregate of various rocks modified with silica

Порода и состав щебня	Количество микрокремнезема, %						
	0	3	6	9	12	15	18
Г+К / Г	20,4/20,9	21,5	22,5	24,3	23,1	21,3	20,4
П+К / П	20,1/20,4	21,0	21,6	23,3	22,3	20,8	19,7
И+К / И	19,2/19,4	19,9	20,4	21,6	20,9	19,8	18,6

Примечание: через дробь прочность на сжатие бетона на крупном плотном заполнителе / прочность на сжатие облегченного бетона на смешанном заполнителе.

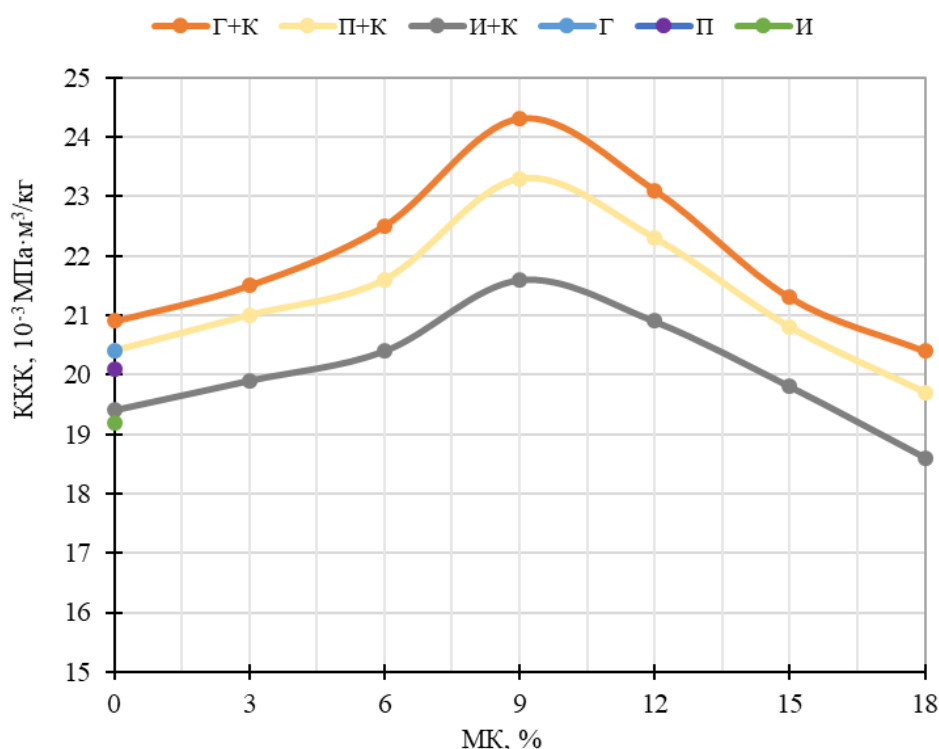


Рис. 4. Коэффициент конструктивного качества (ККК) бетона на крупном заполнителе из различных горных пород в зависимости от количества микрокремнезема
Fig. 4. Coefficient of constructive quality (CCQ) of concrete on a large aggregate of various rocks, depending on the amount of microsilicon

Еще один этап данного исследования заключался в анализе изменений прочности на сжатие и коэффициента конструктивного качества облегченного бетона на различных видах заполнителей при варьировании количества модифицирующей добавки.

Результаты анализа представлены в табл. 9 и 10 и на рис. 5 и 6. Сравнение значений увеличения прочности на сжатие и показало наибольший рост данного свойства у облегченного бетона с гранитным заполнителем (17,2 %) в

сравнении с песчаником (15,1 %) и известняковым щебнем (12,0 %).

Сравнение значений увеличения ККК, как комплексного показателя, характеризующего отношение изменения прочности бетона к изменению его веса, подтвердило предыдущие результаты по прочности на сжатие и показало наибольший рост данного коэффициента у облегченного бетона, модифицированного 9 % микрокремнезема, на гранитном щебне (19,1 %), нежели у такого же бетона на песчанике (15,9 %) и известняковом крупном заполнителе (12,5 %).

Таблица 9. Разница в прочности на сжатие облегченного бетона (%) на крупном заполнителе из различных горных пород, модифицированного микрокремнеземом

Table 9. Difference in compressive strength of lightweight concrete (%) on a large aggregate of various rocks modified with silica

Порода и состав щебня	Количество микрокремнезема, %						
	0	3	6	9	12	15	18
Г+К	0	3,14	7,56	17,19	11,53	2,10	-2,90
П+К	0	2,85	6,38	15,10	9,74	1,95	-3,80
И+К	0	2,49	5,49	12,0	8,0	1,74	-4,74

Таблица 10. Разница в ККК облегченного бетона (%) на крупном заполнителе из различных горных пород, модифицированного микрокремнеземом

Table 10. The difference in CCQ of lightweight concrete (%) on a large aggregate of various rocks modified with silica

Порода и состав щебня	Количество микрокремнезема, %							
	0*	0	3	6	9	12	15	18
Г+К (Г*)	0	2,45	5,39	10,29	19,12	13,24	4,41	0
П+К (П*)	0	1,49	4,48	7,46	15,92	10,95	3,48	-1,99
И+К (И*)	0	1,04	3,65	6,25	12,5	8,85	3,13	-3,12

Примечание: * – бетон без пористого заполнителя.

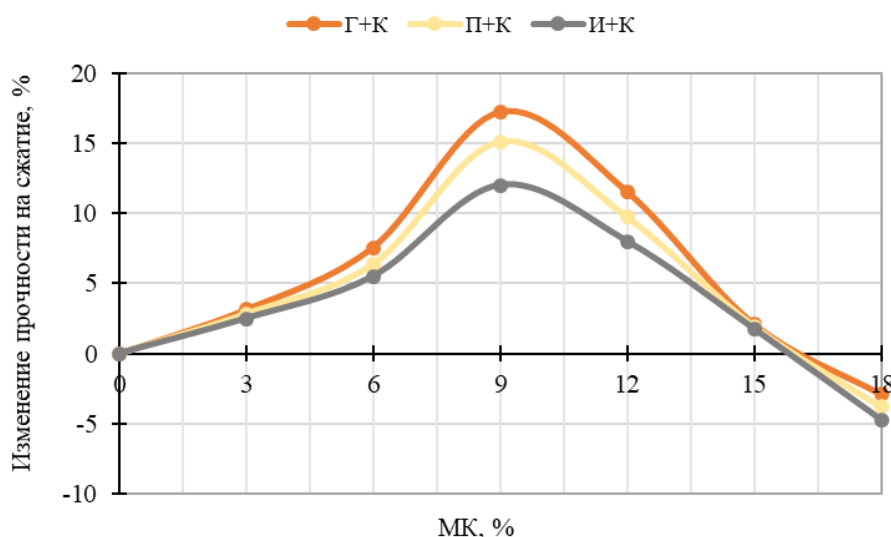


Рис. 5. Изменение прочности на сжатие облегченного бетона на различных видах крупного заполнителя, модифицированного микрокремнеземом

Fig. 5. Change in the compressive strength of lightweight concrete on various types of coarse aggregate modified with silica

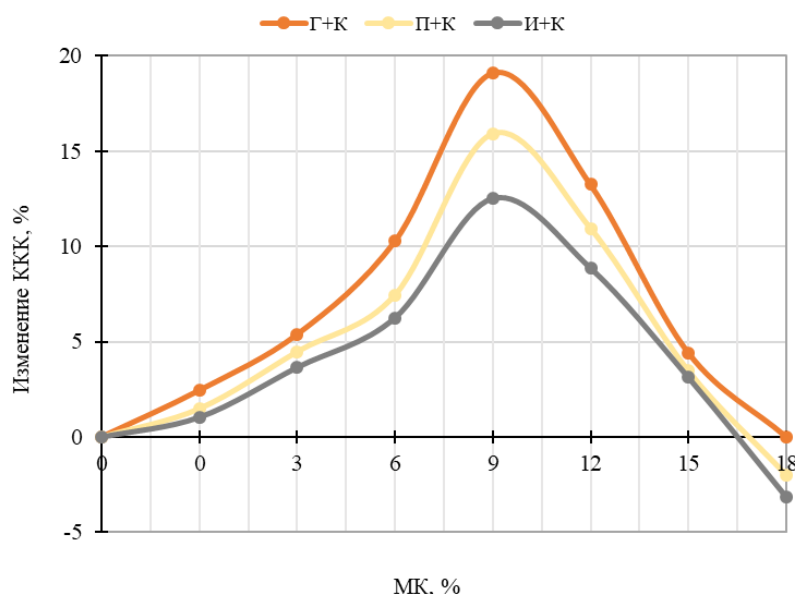


Рис. 6. Изменение коэффициента конструктивного качества на различных видах крупного заполнителя, модифицированного микрокремнеземом
Fig. 6. Changes in coefficient of structural quality of concrete for various types of coarse aggregate modified with microsilica

Эти увеличения зафиксированы в сравнении с бетонами без пористого заполнителя и без модифицирующей добавки.

Подытоживая все полученные результаты, можно сделать вывод о наибольшей эффективности облегченного бетона на гранитном щебне, модифицированном микрокремнеземом в количестве 9 %. Эта эффективность проявляется в наибольших значениях прочности на сжатие (55,9 МПа) и ККК ($24,3 \cdot 10^{-3}$ МПа $\cdot$ м³/кг) и увеличения прочности на сжатие (17,2 %) и ККК (19,1 %).

Проанализируем полученные результаты с точки зрения качественной и количественной картины распределения свойств и особенностей структурообразования бетонов на комбинированном крупном заполнителе, включающем плотные и пористые зерна.

Итак, как было установлено в ходе экспериментальных исследований, качественная картина подтверждает рабочую гипотезу исследования в том плане, что наилучшей структурой и свойствами, очевидно, обладает бетон с применением щебня из наиболее высокопрочной, плотной и высококачественной гранитной породы, при условии рациональной дозировки и соотношения между гранитным щебнем и керамзитовым гравием в составе применяемого крупного заполнителя.

Следует отметить, что при этом наблюдается максимальный комплексный эффект, заключающийся в одновременном улучшении качественной картины структурообразования за счет создания относительно релаксирован-

ных зон с получением при этом максимально плотной упаковки частиц в межзерновом пространстве. Достигается это с помощью модификации микрокремнеземом, т.е. на выходе формируется новый композит – микромодифицированный облегченный бетон на основе смеси заполнителей (гранитного щебня и керамзитового гравия). Тем самым, учитывая особенности формы зерен, а именно шероховатую угловатую поверхность гранитного щебня и окатанную, но, тем не менее, относительно шероховатую поверхность керамзитового гравия, и с учетом максимально рациональной дозировки компонентов с применением песка, соответствующего требованиям нормативной документации, и микромодификатора в оптимальном процентном соотношении, слитность структуры достигается в максимальном значении. В то же время помимо абсолютных показателей, таких как слитность структуры и прочностные характеристики, важны относительные характеристики, и в первую очередь коэффициент конструктивного качества.

Такой коэффициент показывает достоверную картину максимальной эффективности примененного способа, выраженную в оптимальности разработанного состава с применением модификации микрокремнеземом в количестве 9 %, а также комбинации двух видов заполнителей. В конечном итоге возникает наилучшее соотношение эксплуатационных и физико-механических свойств. Таким образом, прирост коэффициента конструктивного

качества является высокоточным показателем, отражающим количественную картину полученного результата.

Что же касается остальных составов с применением других видов плотного заполнителя, таких как известняк и песчаник, то эффективность предложенной комплексной модификации оказалась несколько ниже, чем у облегченного бетона с применением гранита, что также показывает определенную закономерность, выраженную в сформулированной ниже взаимосвязи. Установлено, что повышение качества применяемого тяжелого заполнителя из плотных горных пород в предложенном способе ведет к увеличению коэффициента конструктивного качества бетона, что обуславливается в первую очередь приростом его механических характеристик при сопутствующем сохранении в относительном значении плотностных и весовых характеристик.

ВЫВОДЫ

В исследовании проведен анализ существующей научной литературной базы по облегченным бетонам, их рецептуре, технологии и научной обоснованности, структурной совместимости применяемых компонентов. Проведены экспериментальные исследования по изучению влияния рецептурно-технологических факторов при модификации

микрокремнеземом облегченных бетонов на их эксплуатационные характеристики. Проведено сравнение эффективности такой модификации при различных исходных рецептурно-технологических параметрах, обусловивших разницу в приростах показателей эффективности и, в первую очередь, плотности, прочности и коэффициента конструктивного качества.

Модификация микрокремнеземом не приводит к существенному изменению плотности облегченных бетонов: с увеличением количества модификатора плотность сначала показывает небольшой рост, затем небольшое уменьшение. Прочность же модифицированного облегченного бетона и его ККК существенно изменяются в сравнении с немодифицированным облегченным бетоном.

Наибольшую эффективность показал облегченный бетон на гранитном щебне, модифицированный микрокремнеземом в количестве 9%.

Эта эффективность отразилась в наибольших значениях прочности на сжатие (55,9 МПа) и ККК ($24,3 \cdot 10^{-3}$ МПа·м³/кг) и увеличения прочности на сжатие (17,2 %) в сравнении с немодифицированным облегченным бетоном и ККК (19,1 %) при сопоставлении с немодифицированным бетоном на крупном плотном заполнителе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов Ю.М., Федюк Р.С., Лесовик В.С. Обзор современных высокоэффективных бетонов // Наукоемкие технологии и инновации: материалы Международной науч.-практ. конф., посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород, 29 апреля 2019 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. Ч. 4. С. 45–49. https://doi.org/10.12737/conferencearticle_5cecedc1472d77.15382194. EDN: MOGOKR.
2. Абдыкалыков Т.А., Джамаева А.М. Облегченные мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих веществ // Материаловедение. 2017. № 2 (22). С. 20–23. EDN: FTHADU.
3. Khalyushev A., Mayilyan A., Stelmakh S., Shcherban E. The activation technology for the surface modification high voltage electric field dispersed mineral additives for concrete // Materials science forum. 2020. Vol. 1011. P. 23–30. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1011.23>.
4. Федосов С.В., Акулова М.В., Гунина Н.М., Потемкина О.В. Исследование влияния вида и размера заполнителя на свойства цементного композита // Строительство и реконструкция. 2012. № 3 (41). С. 59–65. EDN: OZMCHJ.
5. Леонович С.Н., Полейко Н.Л. Эксплуатационные характеристики бетона на заполнителе из осадочных горных пород // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 66–69. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-740-8-66-69>.
6. Чернильник А.А., Ельшаева Д.М., Жеребцов Ю.В., Доценко Н.А., Самофалова М.С. Выбор рациональной рецептуры облегченных бетонов на смеси керамзитового гравия, природного щебня и гранулированного шлака // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 12. С. 34–42. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-12-34-42>. EDN: RZZMMM.
7. Mailyan L.R., Beskopylny A.N., Meskhi B., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Ananova O. Optimization of composition and technological factors for the lightweight fiber-reinforced concrete production on a combined aggregate with an increased coefficient of structural quality // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 16. P. 7284. <https://doi.org/10.3390/app11167284>.

8. Смоляниченко А.С., Чернильник А.А., Ельшаева Д.М., Жеребцов Ю.В., Доценко Н.А., Самофалова М.С., и др. Вариатронная эффективность центробежно уплотненных облегченных бетонов на комбинированных заполнителях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4 (39). С. 662–673. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-662-673>. EDN: VSPZWF.
9. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Varavka V. Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 23. P. 7347. <https://doi.org/10.3390/ma14237347>.
10. Abdelgader H.S., Fediuk R.S., Kurpinska M., Khatib J., Murali G., Baranov A.V., et al. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 89. Iss. 5. P. 26–38. <https://doi.org/10.18720/MCE.89.3>. EDN: ATOSCY.
11. Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Цой В.М., Шаумаров С.С. Научно-обоснованная методика подбора добавок при проектировании состава комплексно-модифицированных бетонов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 269–279. EDN: ZYJKWL.
12. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы. 2021. № 12. С. 48–54. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54>. EDN: MWNAJK.
13. Кашапов Н.Ф., Ямалеев М.М., Лукашин Л.Н., Гребенщиков Е.А., Гилев И.Ю., Кашапов Р.Н., и др. Структура и анализ наночастиц аморфного диоксида кремния // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 6. С. 85–94. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94>. EDN: JFTZBK.
14. Özkılıç Y.O., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B., et al. Lightweight expanded-clay fiber concrete with improved characteristics reinforced with short natural fibers // Case studies in construction materials. 2023. Vol. 19. P. e02367. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02367>.
15. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete // Magazine of civil engineering. 2018. Vol. 2 (78). P. 151–160. <https://doi.org/10.18720/MCE.78.12>. EDN: XPKZUT.
16. Джаббаров Н.Э., Гасанова У.Ф. Влияние добавки микрокремнезема на прочность бетона // Проблемы науки. 2022. № 1 (69). С. 12–15.
17. Bily P., Fladr J., Chylik R., Vrablik L., Hrbek V. The effect of cement replacement and homogenization procedure on concrete mechanical properties // Magazine of civil engineering. 2019. Vol. 2 (86). P. 46–60. <https://doi.org/10.18720/MCE.86.5>. EDN: ZBEMFY.
18. Ибрагимова А.Р., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Микрокремнезем как модификатор // Жизненный цикл конструкционных материалов: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции (г. Иркутск, 06 июня 2022 г.). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. С. 282–285. EDN: CCKBJE.
19. Khalyushev A., Stelmakh S., Shcherban E., Chernilnik A. Structural formation of the cement pastes based on the concrete modified dispersed mineral components // Materials science forum. 2020. Vol. 1011. P. 14–22. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1011.14>.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Fedyuk R.S., Lesovik V.S. Review of modern high-performance concretes. In: *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 65-letiyu BGTU im. V.G. Shukhova = High-tech technologies and innovations: materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of V.G. Shukhov BSTU*. 29 April 2019, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University V.G. Shukhov; 2019. Part 4. p. 45–49. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/conferencearticle_5cecedc1472d77.15382194. EDN: MOGOKR.
2. Abdykalykov T.A., Dzhamalova A.M. Lightweight fine-grained concretes based on composite binders. *Materialovedenie*. 2017;2:20–23. (In Russ.). EDN: FTHADU.
3. Khalyushev A., Mailyan A., Stelmakh S., Shcherban E. The activation technology for the surface modification high voltage electric field dispersed mineral additives for concrete. *Materials science forum*. 2020;1011:23–30. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1011.23>.
4. Fedosov S.V., Akulova M.V., Gunina N.M., Potemkina O.V. Investigation of the influence of the type and size of aggregate on the properties of cement composite. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and reconstruction*. 2012;3(41):59–65. (In Russ.). EDN: OZMCHJ.
5. Leonovich S.N., Poleyko N.L. Operational characteristics of concrete on aggregate from sedimentary rocks. *Stroitel'nye materialy = Building materials*. 2016;8:66–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-740-8-66-69>.
6. Chernil'nik A., El'shaeva D., Zhrebtsov Y., Dotsenko N., Samofalova M. Selection of a rational recipe of

- lightweight concrete on a mixture of ceramsite gravel, natural crushed stone and granular slag. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* = *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2021;12:34-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-12-34-42>. EDN: RZZMMM.
7. Mailyan L.R., Beskopylny A.N., Meskhi B., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Ananova O. Optimization of composition and technological factors for the lightweight fiber-reinforced concrete production on a combined aggregate with an increased coefficient of structural quality. *Applied Sciences*. 2021;11(16):7284. <https://doi.org/10.3390/app11167284>.
8. Smolyanichenko A.S., Chernil'nik A.A., El'shaeva D.M., Zherebtsov Yu.V., Dotsenko N.A., Samofalova M.S., et al. Variotropic efficiency of centrifugal lightened concrete based on combined fillers. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(4):662-673. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-662-673>. EDN: VSPZWF.
9. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Varavka V. Nanomodification of lightweight fiber reinforced concrete with micro silica and its influence on the constructive quality coefficient. *Materials*. 2021;14(23):7347. <https://doi.org/10.3390/ma14237347>.
10. Abdelgader H.S., Fediuk R.S., Kurpinska M., Khatib J., Murali G., Baranov A.V., et al. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;89(5):26-38. <https://doi.org/10.18720/MCE.89.3>. EDN: ATOSCY.
11. Adilhodjaev A.I., Mahamataliev I.M., Tsoy V.M., Shaumarov S.S. Scientifically-based methodology for the selection of additives in the design of the composition of complex-modified concrete. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019;2:269-279. (In Russ.).
12. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers. *Stroitel'nye materialy* = *Construction materials*. 2021;12:48-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54>. EDN: MWNAJK.
13. Kashapov N.F., Yamaleev M.M., Lukashin L.N., Grebenshchikov E.A., Gilev I.Yu., Kashapov R.N., et al. Structure and analysis of amorphous silicon dioxide nanoparticles. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* = *Construction materials and products*. 2022;5(6):85-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94>. EDN: JFTZBK.
14. Özkılıç' Y.O., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B., et al. Lightweight expanded-clay fiber concrete with improved characteristics reinforced with short natural fibers. *Case studies in construction materials*. 2023;19:02367. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02367>.
15. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018;2(78):151-160. <https://doi.org/10.18720/MCE.78.12>. EDN: XPKZUT.
16. Jabbarova N.E., Gasanova U.F. The effect of the addition of silica on the strength of concrete. *Problemy nauki* = *Problems of Science*. 2022;1(69):12-15. (In Russ.).
17. Bily P., Fladr J., Chylik R., Vrablik L., Hrbek V. The effect of cement replacement and homogenization procedure on concrete mechanical properties. *Magazine of civil engineering*. 2019;86(2):46-60. <https://doi.org/10.18720/MCE.86.5>. EDN: ZBEMFY.
18. Ibragimova A.R., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Microsilicon as a modifier. In: *Zhiznennyy tsikl konstruktivnykh materialov: materialy XII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = *Life cycle of structural materials: materials of the XII All-Russian scientific and technical conference*. 06 June 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022. p. 282-285. (In Russ.). EDN: CCKBJE.
19. Khalyushev A., Stelmakh S., Shcherban E., Chernilnik A. Structural formation of the cement pastes based on the concrete modified dispersed mineral components. *Materials science forum*. 2020;1011:14-22. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1011.14>.

Информация об авторах

Паскачев Асламбек Боклуевич,
д.э.н., профессор, директор,
Институт миграции и межнациональных
отношений,
123308, г. Москва, ул. 3-я Хорошевская, 2, стр. 1,
Россия,
e-mail: apaskachev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-3815-9615>

Information about the authors

Aslambek B. Paskachev,
Dr. Sci. (Econ.),
Professor, Director,
Institute of Migration and Interethnic Relations,
3-ya Khoroshevskaya St., 2 building 1,
Moscow 123308, Russia,
e-mail: apaskachev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-3815-9615>

Ржевская Татьяна Геннадьевна,
д.э.н., профессор,
профессор кафедры строительных
сооружений, конструкций и материалов,
Научно-исследовательский центр
«Строительство»,
141367, г. Сергиев Посад,
пос. Загорские Дали, 6-11, Россия,
e-mail: rzhevskaiatiana@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-4291-6134>
Author ID: 1230739

Стельмах Сергей Анатольевич,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой строительства уникальных
зданий и сооружений,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
✉e-mail: sergej.stelmax@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0364-5504>
Author ID: 782068

Щербань Евгений Михайлович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры инженерной геологии,
оснований и фундаментов,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: au-geen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5376-247X>
Author ID: 677684

Маилян Лия Дмитриевна,
к.э.н., доцент
и.о. заведующего кафедрой
организации строительства,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: liya_mailyan@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>
Author ID: 1000855

Маилян Александр Леонович,
к.т.н., доцент,
профессор кафедры городского
строительства и хозяйства,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: mailyan_a@sroufo.ru
<https://orcid.org/0009-0008-2094-2536>
Author ID: 1020822

Tat'yana G. Rzhevskaya,
Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Professor of the Department of Civil Engineering,
Structures and Materials,
Research Center "Construction",
6-11, Zagorskie Dali, 141367 Moscow region,
Sergiev Posad,
Russia,
e-mail: rzhevskaiatiana@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-4291-6134>
Author ID: 1230739

Sergei A. Stel'makh,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Construction of Unique
Buildings and Structures,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022,
Russia,
✉e-mail: sergej.stelmax@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0364-5504>
Author ID: 782068

Evgenii M. Shcherban,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Engineering Geology, Bases
and Foundations,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: au-geen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5376-247X>
Author ID: 677684

Liya D. Mailyan,
Cand. Sci. (Econ.),
Associate Professor,
Acting Head of the Department
of Construction Organization,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: liya_mailyan@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>
Author ID: 1000855

Aleksandr L. Mailyan,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor,
Professor of the Department of Urban
Construction and Economy,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: mailyan_a@sroufo.ru
<https://orcid.org/0009-0008-2094-2536>
Author ID: 1020822

Вклад авторов

Паскачев А.Б., Ржевская Т.Г., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Маилян Л.Д., Маилян А.Л. имеют равные авторские права. Стельмах С.А. несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Aslambek B. Paskachev, Tat'yana G. Rzhetskaya, Sergei A. Stel'makh, Evgenii M. Shcherban', Liya D. Mailyan, Aleksandr L. Mailyan have equal author's rights. Sergei A. Stel'makh bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.11.2023.
Одобрена после рецензирования 20.12.2023.
Принята к публикации 25.12.2023.

Information about the article

The article was submitted 23.11.2023.
Approved after reviewing 20.12.2023.
Accepted for publication 25.12.2023.