

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-17

***Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С.**

Брянский государственный инженерно-технологический университет

*E-mail: natluk58@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА КВАРЦЕВО-ГЛАУКОНИТОВОМ ПЕСКЕ С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния комплексной добавки микрокремнезема, суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата и ускорителя твердения (нитрата кальция) на прочность мелкозернистого бетона (МЗБ) с кварцево-глауконитовым песком (КГП) – отходом обогащения фосфоритных руд Полтавского месторождения Брянской области. Выполнен анализ химического и минерального составов, структуры, истинной и насыпной плотности, пустотности, модуля крупности и водопотребности КГП как заполнителя для бетона. Выявлено, что основными минералами, содержащимися в КГП, являются кварц, глауконит, фторапатит (флюорит) и калиевый полевой шпат. Присутствие в песке мелких частиц глауконита различной степени деструкции приводит к увеличению удельной поверхности КГП и возрастанию водопотребности на 57–71 %. Методом трехфакторного планирования эксперимента получены уравнения и поверхности отклика зависимости прочности МЗБ с КГП через 28 суток твердения от количества компонентов комплексной добавки. Установлено, что совместное введение 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция способствует ускорению набора прочности мелкозернистого бетона с кварцево-глауконитовым песком и повышению его прочности на сжатие от 9,6 до 30,9 МПа, на изгиб от 2,2 до 6,7 МПа.

Ключевые слова: кварцево-глауконитовый песок, мелкозернистый бетон, микрокремнезем, суперпластификатор, ускоритель твердения, трехфакторное планирование эксперимента, прочность на сжатие и изгиб.

Введение. Мелкозернистый бетон (МЗБ) является одним из эффективных материалов благодаря своей однородной структуре, высокой плотности, отличной удобоукладываемости, хорошей морозостойкости и возможности получения строительных конструкций любой конфигурации.

В то же время, МЗБ имеет некоторые особенности, обусловленные его структурой, для которой характерны меньшая прочность по сравнению с тяжелым бетоном, отсутствие жесткого каменного скелета, и соответственно, значительная усадка и пониженный модуль упругости, повышенная пористость и удельная поверхность твердой фазы [1–3]. Высокая дисперсность компонентов мелкозернистого бетона требует повышенного расхода цемента и воды, что приводит к снижению прочностных показателей и повышению пористости системы.

Тонкодисперсные минеральные наполнители (ТМН), как правило, повышают прочность и снижают усадку МЗБ. Это связано с тем, что они заполняют пустоты, повышая плотность и однородность смеси, уменьшая усадку и предотвращая образование трещин. Частицы ТМН могут являться также центрами для образования и роста кристаллов цементного камня, а в случае их пулеволанической активности обеспечивают формирование дополнительного количества гидросили-

катов кальция, что способствует улучшению процесса структурообразования и ускоряет гидратацию цемента [4–6].

Использование ТМН приводит к снижению подвижности мелкозернистых бетонных смесей. Это обусловлено тем, что частицы ТМН, распределяясь в объеме цементного теста, образуют пространственные коагуляционные контакты, повышающие вязкость смесей.

Одним из наиболее эффективных, универсальных и гибких способов поддержания или повышения подвижности смесей с ТМН является применение пластифицирующих добавок [7–13].

В рамках реализации «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» наблюдается устойчивая динамика – активное вовлечение отходов в производство строительных материалов и увеличение глубины переработки природных ресурсов.

Скопившееся в настоящее время значительные объемы отходов от переработки различного минерального сырья, размеры занятых под ними площадей, а также возможность получения из них различной товарной продукции с одновременным снижением экологической нагрузки указывает на целесообразность вовлечения таких отходов в переработку [14, 15]. Такие промышленные отходы, как «хвосты» обогащения полезных

ископаемых, состоят в основном из пустой породы, то есть имеют минимальное содержание полезного компонента. Как правило, «хвосты» непригодны для дальнейшей переработки и удаляются в отвалы и/или хвостохранилища.

Полпинское месторождение фосфоритных руд Центральной России относится к песчанистому типу желваковых фосфоритов размерами 1–7 см, находящиеся в кварцево-глауконитовом песке (КГП). Месторождение представлено двумя пластами фосфоритных желваков, заключенных в глауконитовом песке, которые залегают на глубине 4,5–7 м и разделены слоями песка мощностью до 1 м. Ранее выполненные исследования показали, что с точки зрения экономики отходы обогащения КГП являются отличным и доступным сырьем для производства строительных материалов. Однако более низкие (в 1,5–2 раза) значения прочности бетона с КГП, по сравнению с кварцевым песком, существенно ограничивают область его применения [16].

Решение проблемы использования КГП в технологии мелкозернистого бетона и повышения прочностных показателей возможно за счет модификации его структуры высокоеффективными комплексными добавками.

Целью работы является исследование прочности МЗБ на кварцево-глауконитовом песке с комплексной добавкой (КД) микрокремнезема, суперпластификатора и ускорителя твердения.

Для достижения поставленной цели решались задачи по изучению химического и минерального составов, структуры, плотности, пустотности, модуля крупности и водопотребности КГП как заполнителя для бетона; установлению характера изменения прочности МЗБ с кварцево-глауконитовым песком от количества компонентов КД.

Материалы и методы. Для изготовления МЗБ использовались:

- нормальновердеющий портландцемент (ПЦ) типа ЦЕМ I, класса прочности 42,5 по ГОСТ 31108-2020 (управляющая компания холдинга «Белорусская цементная компания», г. Минск);

- кварцево-глауконитовый песок – отход обогащения фосфоритных руд Полпинского месторождения (ООО «АИП-Фосфаты», Брянская область);

- комплексная добавка (КД) микрокремнезема (МК) марки МК-85 по ТУ 24.10.12-005605757665-2021 (ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк), суперпластификатора (СП) MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата (ООО «Строительные системы», Московская область), ускорителя твердения (УТ) – нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ по ТУ 20.13.42-017-67555138-2021 (АО «ОХК

«Уралхим», Кировская область);

– вода по ГОСТ 23732-2011.

Мелкозернистые бетонные смеси готовились путем совместного перемешивания портландцемента, микрокремнезема, песка и 2/3 воды с ускорителем твердения. Суперпластификатор вводился с последней третью воды затворения. Подвижность смесей оценивалась по расплыву конуса на встряхивающем столике в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4-81.

Химический состав кварцево-глауконитового песка исследовался рентгенофлуоресцентной спектроскопией на приборе ARL 9900 WorkStation (США), минеральный состав – рентгенофазовым анализом на дифрактометре ARL X'TRA (Швейцария), а его структура – сканирующей электронной микроскопией на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия).

Истинная и насыпная плотность, пустотность, модуль крупности КГП определялись по ГОСТ 8735-88, водопотребность КГП – способом, предложенным Ю.М. Баженовым и Б.Г. Скрамтаевым, по разности водоцементных отношений для цементно-песчаного раствора и для цементного теста при условии их одинаковой подвижности:

$$B_{\text{КГП}} = \frac{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{\text{ЦПР}} - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_{\text{ЦТ}}}{\frac{\Pi}{\Pi}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $B_{\text{КГП}}$ – водопотребность кварцево-глауконитового песка (КГП), %;

$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{\text{ЦПР}}$ – водоцементное отношение в цементно-песчаном растворе (ЦПР);

$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{\text{ЦТ}}$ – водоцементное отношение в цементном teste (ЦТ);

$\frac{\Pi}{\Pi}$ – отношение массы песка к массе цемента.

Определение прочности МЗБ выполнялось по ГОСТ 10180-2012 на образцах-балочках размерами $40 \times 40 \times 160$ мм на гидравлическом прессе Matest C040N.

Испытания образцов на изгиб и сжатие проводились через 2, 7 и 28 суток их твердения в нормальных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и влажности $(95 \pm 5)\%$.

В качестве критерия оценки скорости набора прочности МЗБ использовалось отношение $R_{\text{сж}}^2/R_{\text{сж}}^{28}$ по ГОСТ 25192-2012, где $R_{\text{сж}}^2$ и $R_{\text{сж}}^{28}$ – прочность на сжатие бетона через 2 и 28 суток, соответственно.

Характер изменения прочности мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке от количества компонентов комплексной до-

бавки изучался методом трехфакторного планирования эксперимента, включающего следующие этапы:

- выбор факторов, уровней и интервалов их варьирования (табл. 1);
- составление матрицы композиционного плана эксперимента (КПЭ) (табл. 2);

- проведение опытов и испытаний;
- расчет коэффициентов регрессии и оценка их статистической значимости;
- получение уравнений зависимости прочности на сжатие и изгиб от варьируемых факторов и оценка их адекватности, графическая интерпретация и анализ математических моделей.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы их варьирования

Варьируемые факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	нижний уровень (-1)	основной уровень (0)	верхний уровень (+1)	
МК, %	x_1	0	10	20	10
СП, %	x_2	0	1,5	3	1,5
УТ, %	x_3	0	2	4	2

Таблица 2

Матрица КПЭ

Номер опыта (u)	Значения варьируемых факторов						Зависимость прочности МЗБ на сжатие и изгиб от варьируемых факторов (y_i)	
	кодированные			натуральные				
	x_1	x_2	x_3	МК, %	СП, %	УТ, %		
1	-1	-1	-1	0	0	0	$y_i (u_1)$	
2	+1	-1	-1	20	0	0	$y_i (u_2)$	
3	-1	+1	-1	0	3	0	$y_i (u_3)$	
4	-1	-1	+1	0	0	4	$y_i (u_4)$	
5	-1	+0,19	+0,19	0	1,785	2,38	$y_i (u_5)$	
6	+0,19	-1	+0,19	11,9	0	2,38	$y_i (u_6)$	
7	+0,19	+0,19	-1	11,9	1,785	0	$y_i (u_7)$	
8	-0,29	+1	+1	7,1	3	4	$y_i (u_8)$	
9	+1	-0,29	+1	20	1,065	4	$y_i (u_9)$	
10	+1	+1	-0,29	20	3	1,42	$y_i (u_{10})$	

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием программы PlanExp B-D13, позволяющей рассчитывать коэффициенты для уравнений регрессии, оценивать их статистическую значимость по критерию Стьюдента и адекватность по критерию Фишера [17]. По значимым коэффициентам статистически уточненных уравнений осуществлялся расчет (в Excel) прочности на сжатие и изгиб мелко-зернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке через 28 суток твердения в зависимости от заданных факторов, влияние которых отображалось в виде поверхностей отклика, построенных с помощью программы Sigma Plot.

Основная часть. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе ARL 9900 WorkStation (США) установлено, что содержание оксида кремния SiO_2 в исследуемых пробах КГП находится в пределах от 84,12 до 86,11 %, оксида фосфора P_2O_5 от 2,49 до 4,4 %, оксида кальция CaO от 1,8 до 3,77 %, оксида алюминия Al_2O_3 от 1,74 до 2,5 %, оксида железа Fe_2O_3 от 1,23 до 1,47 %, оксида калия K_2O от 0,81 до 1,13 % и др.

Результаты на дифрактометре ARL X'TRA

(Швейцария) показали, что основными минералами кварцево-глауконитового песка являются кварц (более 80 %), глауконит (до 14 %), фторапатит (флюорит), калиевый полевой шпат. Кроме того, в КГП содержатся примеси диоксида титана, родоликонита и др.

Глауконит имеет в основном осадочное происхождение; иногда – гидротермально-метасоматическое (замещает другие минералы). Он не образует крупных скоплений и распространен в виде примеси во многих осадочных породах и в современных морских осадках [18–20]. Встречается в песках, песчаниках, глинах, мергелях, известняках, батиальном иле, окрашивая их в зеленоватые цвета. Как и в других слоистых силикатах, кремнекислородные тетраэдры глауконита образуют слои $\text{Si}_4\text{O}_{10}^4$, сочетающиеся с октаэдрическими структурами, в центре которых находятся алюминий, магний или железо, а в вершинах – гидроксильные группы (рис. 1). Кислородные слои каждой структурной единицы находятся рядом с кислородными атомами соседних структурных единиц, вследствие этого связь между смежными структурными единицами достаточно слаба.

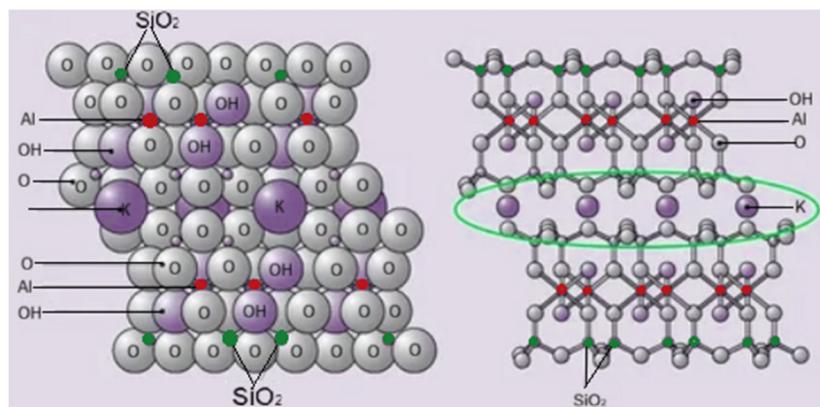
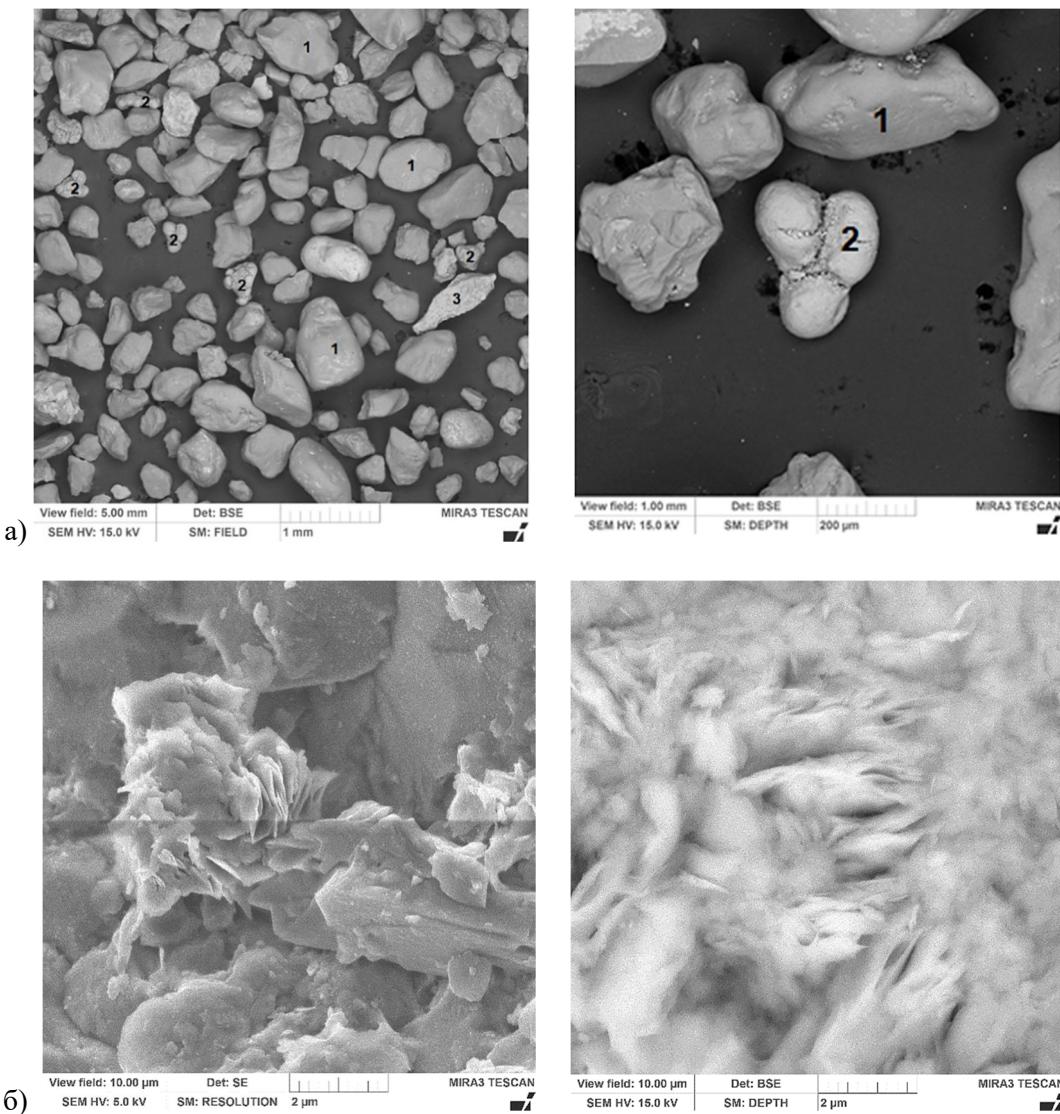


Рис. 1. Строение глауконита

Характерной особенностью глауконитов является широкое развитие деструктивных процессов в результате генезиса, сопровождавшихся окатыванием и разрушением их поверхности, так и формированием минеральных фаз, обрастающих зерна глауконита глобулярной и смешанно-слоистой структуры. Эти новообразования

имеют характер точечных вкраплений или сплошных скоплений, покрывающих поверхность зерен, иногда по всей ее площади, а также сосредоточенных на участках срастания и по трещинам отдельных глобул, что показали данные сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия) (рис. 2).

Рис. 2. Структура кварцево-глауконитового песка (а) и глауконита (б):
1 – кварц; 2 – глауконит; 3 – калиевый полевой шпат

В ходе выполненного исследования определены истинная и насыпная плотность, пустотность, модуль крупности и водопотребность КГП

как заполнителя для бетона (табл. 3).

Таблица 3

Свойства кварцево-глауконитового песка

Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Модуль крупности	Водопотребность, %
2645–2655	1430–1450	0,45–0,46	1,48–1,55	11,0–11,8

При рассеве КГП на ситах № 0,315 и № 0,16 находится большая часть частиц – до 96 %. Полный остаток на сите № 0,63 составляет 2,1 %. По модулю крупности (1,48–1,55) КГП относится к группе мелких песков в соответствии с ГОСТ

8736-2014. По содержанию естественных радионуклидов (117-137 Бк/кг) исследуемый кварцево-глауконитовый песок относится к материалам, которые могут использоваться для вновь строящихся жилых и общественных зданий (менее 370 Бк/кг).

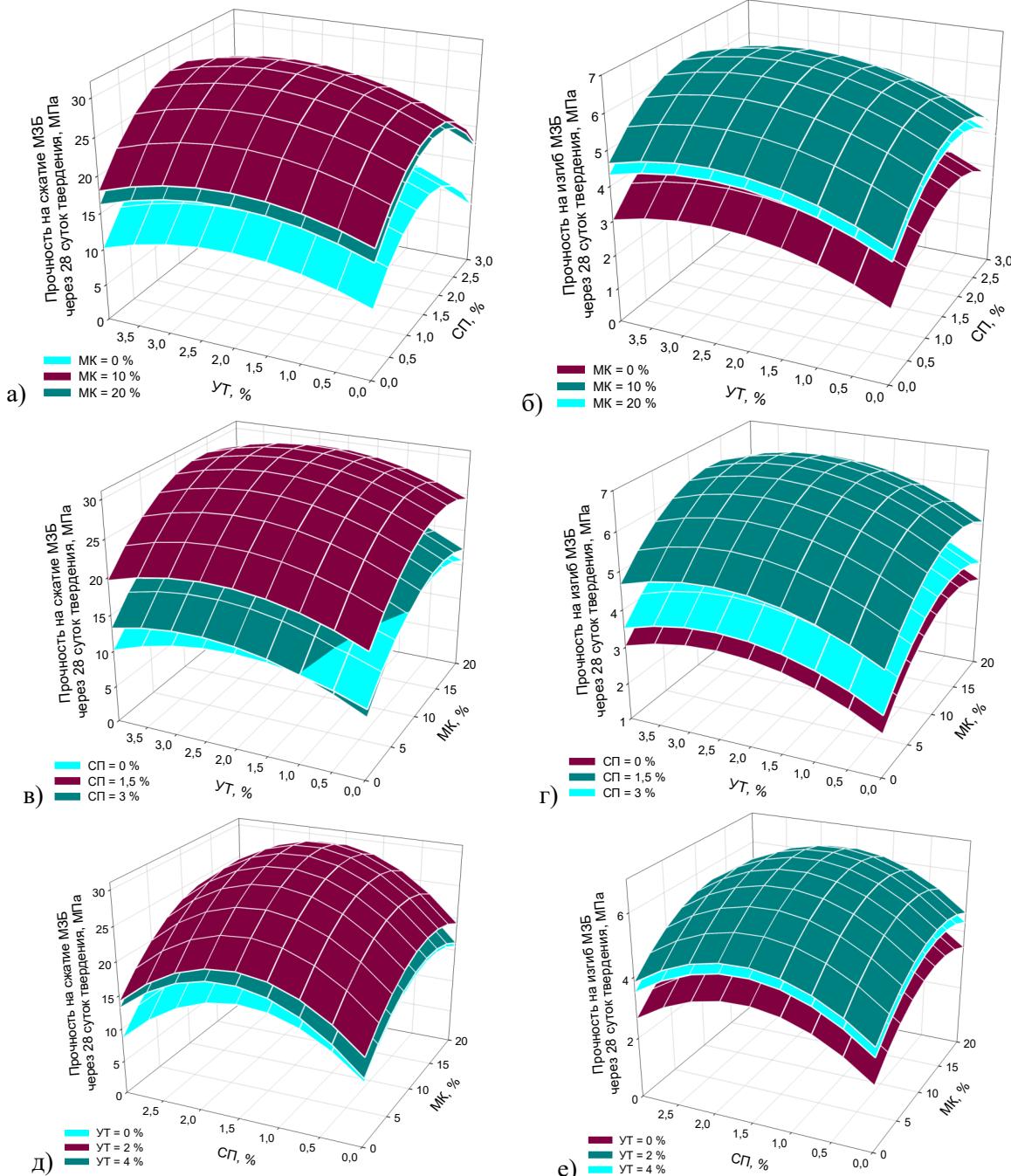


Рис. 3. Поверхности отклика зависимости прочности на сжатие (а, в, д) и изгиб (б, г, е) мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке от количества микрокремнезема (а, б), суперпластификатора (в, г)

и ускорителя твердения (д, е)

Результаты трехфакторного планирования эксперимента показали, что зависимость прочности на сжатие ($y_1 - R_{сж}^{28}$) и изгиб ($y_2 - R_i^{28}$) мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке через 28 суток твердения от количества (в % от массы ПЦ) микрокремнезема ($x_1 - MK$), суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 ($x_2 -$

$$y_1 (R_{сж}^{28}) = 30,12 + 3,68x_1 + 1,17x_2 + 1,29x_3 - 4,83x_1^2 - 7,96x_2^2 - 3,27x_3^2 + 0,67x_1x_2 + 1,03x_2x_3; \quad (2)$$

$$y_2 (R_i^{28}) = 6,58 + 0,64x_1 + 0,24x_2 + 0,43x_3 - 0,96x_1^2 - 1,39x_2^2 - 0,75x_3^2. \quad (3)$$

Из полученных уравнений (2, 3) и поверхностей отклика (см. рис. 3) следует, что увеличение количества компонентов комплексной добавки приводит к росту прочности МЗБ с КГП как на сжатие, так и на изгиб.

Зависимость прочности от содержания микрокремнезема, суперпластификатора и ускорителя твердения носят экстремальный характер.

СП) и ускорителя твердения – нитрата кальция $Ca(NO_3)_2$ ($x_3 - UT$) описываются следующими математическими моделями в виде адекватных (по критерию Фишера) уравнений регрессии со значимыми (по критерию Стьюдента) коэффициентами:

$$y_1 (R_{сж}^{28}) = 30,12 + 3,68x_1 + 1,17x_2 + 1,29x_3 - 4,83x_1^2 - 7,96x_2^2 - 3,27x_3^2 + 0,67x_1x_2 + 1,03x_2x_3; \quad (2)$$

$$y_2 (R_i^{28}) = 6,58 + 0,64x_1 + 0,24x_2 + 0,43x_3 - 0,96x_1^2 - 1,39x_2^2 - 0,75x_3^2. \quad (3)$$

При совместном введении 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция $R_{сж}^{28}$ мелкозернистого бетона с КГП повышается от 9,6 до 30,9 МПа (на 222 %), а R_i^{28} – от 2,2 до 6,7 МПа (на 205 %), по сравнению с МЗБ контрольного состава (табл. 4).

Таблица 4

Составы и показатели прочности мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке

№ состава	ПЦ, кг	КГП, кг	Компоненты КД, % (от массы ПЦ)			Среднее значение прочности МЗБ, МПа			Критерий скорости набора прочности на сжатие МЗБ ($R_{сж}^{28}/R_{сж}^{28}$)			
			МК	СП	УТ	2	7	28				
1 (контрольный)	500	1500	0	0	0	0,3	1,1	2,2	1,9	3,1	9,6	0,20
2	500	1500	5	0	0	1,2	1,7	3,2	4,5	6,9	14,7	0,31
3	500	1500	10	0	0	1,7	2,1	3,8	6,0	9,1	17,5	0,34
4	500	1500	15	0	0	1,8	2,3	3,9	6,5	9,5	17,8	0,37
5	500	1500	20	0	0	1,5	2,1	3,5	5,1	8,3	15,6	0,33
6	500	1500	0	0,75	0	1,0	1,7	3,3	4,8	6,5	15,3	0,31
7	500	1500	0	1,5	0	1,3	2,1	3,8	5,9	7,5	17,1	0,35
8	500	1500	0	2,25	0	1,2	2,0	3,6	5,1	6,1	14,8	0,34
9	500	1500	0	3	0	0,8	1,5	2,7	2,4	2,6	8,6	0,28
10	500	1500	0	0	1,5	1,1	1,8	3,2	4,4	5,2	12,9	0,34
11	500	1500	0	0	2,5	1,2	1,9	3,4	4,5	5,3	13,0	0,35
12	500	1500	0	0	3,5	0,9	1,7	3,3	3,4	4,2	11,5	0,30
13	500	1500	0	0	4	0,6	1,6	3,0	2,5	3,3	10,1	0,25
14 (рациональный по данным КПЭ)	500	1500	15	1,5	2,5	3,7	4,2	6,7	13,6	17,4	30,9	0,44

Примечание: количество воды во всех составах МЗБ соответствовало подвижности бетонных смесей 110 мм по расплыву конуса на вспряхивающем столике.

По критерию скорости набора прочности на сжатие МЗБ с КГП и комплексной добавкой является быстротвердеющим, поскольку $R_{сж}^{28}/R_{сж}^{28}$ составляет 0,44, а МЗБ контрольного состава – медленнотвердеющим ($R_{сж}^{28}/R_{сж}^{28} - 0,20$).

Выводы.

1. Выполнено исследование прочности на сжатие и изгиб мелкозернистого бетона с кварцево-глауконитовым песком от содержания ком-

плексной добавки микрокремнезема, суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата и ускорителя твердения (нитрата кальция).

2. Выявлены структурные особенности и физико-химические свойства кварцево-глауконитового песка – отхода обогащения фосфоритных руд Полпинского месторождения Брянской области. Методами рентгенофлуоресцентной спек-

троскопии, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии установлено, что основными минералами, содержащимися в этом песке, являются кварц, глауконит, фторапатит (флюорит) и калиевый полевой шпат. Присутствие в песке мелких частиц глауконита различной степени деструкции обуславливает увеличение его удельной поверхности и повышение водопотребности на 57–71 %.

3. Результаты трехфакторного планирования эксперимента показали, что совместное использование 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция позволяет получать быстротвердящий мелкозернистый бетон на кварцево-глауконитовым песке с прочностью на сжатие до 30,9 МПа, на изгиб до 6,7 МПа через 28 суток твердения.

Целесообразно продолжить исследования в направлении использования кварцево-глауконитового песка в качестве микронаполнителя в цементные бетоны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1346–1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356 EDN: ASRFQG
2. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Технологические подходы к повышению качества мелкозернистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48 EDN: METYKG
3. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118. Article number 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012020 EDN: VSBEZH
4. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 102–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117 EDN: YWGLOP
5. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 8. С. 1241–1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250 EDN: VJFNFX
6. Белов В.В., Образцов И.В. Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов // Бетон и железобетон. 2021. № 606 (4). С. 29–38. EDN: HYLAUM
7. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А., Шулдяков К.В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 21–25. EDN: XBKBVD
8. Лесовик В.С., Толыгин Д.А., Ряпухин А.Н. Реологические свойства цементных систем, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22. № 3. С. 448–459. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459 EDN: WJQTGA
9. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 62–67. EDN: XXIHSZ
10. Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Санягина Я.А., Христофрова И.А. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органоминеральными добавками // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16. № 6. С. 510–524. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524 EDN: QQDQLS
11. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А., Москвин Р.Н. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 3 (88). С. 97–107. EDN: OLGSSP
12. Перцев В.Т., Халилбеков Я.З., Леденев А.А., Перова Н.С. Состав и технология комплексных добавок для бетона на основе промышленных отходов // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 98–101.
13. Леденев А.А., Козодаев С.П., Перцев В.Т., Барапов Е.В., Загоруйко Т.В., Внуков Д.Н. Механизмы действия различных видов органоминеральных добавок в цементной системе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19 EDN: UFSCDT
14. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А. Перспективы использования отходов цементной промышленности для получения современных бетонных композитов // Строительные материалы. 2021. № 5. С. 55–62. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62 EDN: YRBUSE
15. Amin M., Zeyad A.M., Tayeh B.A., Saad A.I. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete // Construction and Building Materialsater. 2022. Vol. 320. Article number 126233.
16. Lukuttsova N.P., Golovin S.N. Specifics of the Influence of Quartz and Glaucite Sand on the

Concrete Strength // Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Vol. 565. Pp. 157–167.

17. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Горностаева Е.Ю., Головин С.Н., Золотухина Н.В. Моделирование состава мелкозернистого бетона с золошлаковой смесью и суперпластификатором // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2022. № 2 (85). С. 71–77. DOI: 10.53980/24131997_2022_2_71 EDN: QXOFBE

18. Martemyanov D., Rudmin M., Zhuravkov S., Korotkova E., Godymchuk A., Haskelberg M., Plotnikov E. Application of ural glauconite for groundwater deironing and demanganation // Journal of Environmental Science and Health. 2021. Vol. 56(8). Pp. 861–866.

DOI: 10.1080/10934529.2021.1932171

EDN: VFGUBD

19. Bruneel Y., Laer L.V., Brassinnes S., Smolders E. Radioactive sorption on natural glauconite sands is unexpectedly as strong as on Boom Clay // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 720. Article number 137392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137392 EDN: UEOSKO

20. Botsman L.N., Lunev R.S., Ageeva M.S., Nerovnaya S.V. Use of glauconitic sand as a filler in the concrete mixes production // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945(1). Article number 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012081 EDN: GSJJCZ

Информация об авторах

Лукутцова Наталья Петровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных конструкций. E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Головин Сергей Николаевич, магистр. E-mail: s.n.golovin@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Пыкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных конструкций. E-mail: alexem87@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Воробьев Артем Алексеевич, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: landelas73@gmail.com. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Хандожко Евгений Сергеевич, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: evgenuy.whereareyou@gmail.com. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Поступила 12.10.2025 г.

© Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С., 2025

***Lukuttsova N.P., Golovin S.N., Pykin A.A., Vorobyov A.A., Khandozhko E.S.**

Bryansk State Engineering Technological University

*E-mail: natluk58@mail.ru

STUDY OF THE STRENGTH OF CONCRETE ON QUARTZ-GLAUCONITE SAND WITH A COMPLEX ADDITIVE

Abstract. The article presents the results of a study examining the effect of a complex additive of microsilica, MasterGlenium ACE 430 superplasticizer based on a polycarboxylate ester, and a hardening accelerator (calcium nitrate) on the strength of fine-grained concrete with quartz-glaucconite sand – a waste product from phosphate ore processing at the Polpinskoye deposit in the Bryansk region. An analysis was performed of the chemical and mineral composition, structure, true and bulk density, void content, fineness modulus, and water requirement of quartz-glaucconite sand as a concrete aggregate. It was found that the main minerals contained in quartz-glaucconite sand are quartz, glaucocrite, fluorapatite (fluorite), and potassium feldspar. The presence of fine glaucocrite particles of varying degrees of destruction in sand leads to an increase in the specific surface area of quartz-glaucconite sand and an increase in water demand by 57–71 %. Using a three-factor experimental design, equations and response surfaces were obtained for the strength of fine-grained concrete with quartz-glaucconite sand after 28 days of curing as a function of the amount of components in the complex admixture. It was found that the combined addition of 15 % microsilica, 1.5% MasterGlenium ACE

430 superplasticizer, and 2.5 % calcium nitrate accelerated the strength gain of fine-grained concrete with quartz-glaucite sand, increasing its compressive strength from 9.6 to 30.9 MPa and flexural strength from 2.2 to 6.7 MPa.

Keywords: quartz-glaucite sand, fine-grained concrete, microsilica, superplasticizer, hardening accelerator, three-factor experimental design, compressive and flexural strength.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. Increasing the performances of low permeable cement composites [Povyshenie effektivnosti malopronicaemyh cementnyh kompozitov]. Vestnik MGSU. 2021. No. 16 (10). Pp. 1346–1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356. (rus)
2. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Technological approaches to improving the quality of fine-grain concrete [Tekhnologicheskiye podkhody k povysheniyu kachestva melkozernistogo betona]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48. (rus)
3. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118. Article number 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012020
4. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete [Vliyanie kvartsevogo poroshka i mineralnykh dobavok na svoystva vysokoeffektivnykh betonov]. Vestnik MGSU. 2019. No. 14 (1). Pp. 102–117. (rus)
5. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Influence of mineral powders on the properties of binding systems [Vliyanie mineralnykh poroshkov na svoystva vyazhushchikh sistem]. Vestnik MGSU. 2023. No. 18 (8). Pp. 1241–1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117. (rus)
6. Belov V.V., Obraztsov I.V. Optimal structures of raw materials mixtures when manufacturing construction cement composites [Optimalnyye struktury syryevykh smesey pri izgotovlenii stroitelnykh tsementnykh kompozitov]. Concrete and Reinforced Concrete. 2021. No. 606 (4). Pp. 29–38. (rus)
7. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Orlov A.A., Shuldyakov K.V. Modern superplasticizers for concretes, features of their application and effectiveness [Sovremennye superplastifikatory dlya betonov, osobennosti ikh primeneniya i effektivnost']. Construction materials. 2016. No. 11. Pp. 21–25. (rus)
8. Lesovik V.S., Tolypin D.A. Rheological properties of cement systems modified with mineral and plasticizing additives [Reologicheskiye svoystva tsementnykh sistem. modifitsirovannyykh mineralnymi i plastifitsiruyushchimi dobavkami]. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. No. 22 (3). Pp. 448–459. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459. (rus)
9. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation [O primenenii kompleksnykh dobavok v betonakh novogo pokoleniya]. Construction materials. 2017. No. 1-2. Pp. 62–67. (rus)
10. Tarakanov O.V., Erofeeva I.V., Belyakova E.A., Moskvin R.N., Sanyagina Ya.A., Khristoforova I.A. Modeling of the processes of early structure formation and hardening of cement materials with organomineral additives [Modelirovaniye protsessov rannego strukturoobrazovaniya i tverdeniya tsementnykh materialov s organomineralnymi dobavkami]. Nanotechnology in construction. 2024. No. 16 (6). Pp. 510–524. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524 (rus)
11. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Belyakova E.A., Moskvin R.N. Expanding the base of complex organomineral additives in concrete technology [Rasshireniye bazy kompleksnykh organomineralnykh dobavok v tekhnologii betona]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2022. No. 3 (88). Pp. 97–107. (rus)
12. Percev V.T., Halilbekov Ya.Z., Ledenev A.A., Perova N.S. Composition and technology of complex additives for concrete based on industrial waste [Sostav i tekhnologiya kompleksnyh dobavok dlya betona na osnove promyshlennyh othodov]. Journal Cement and its Applications. 2019. No. 3. Pp. 98–101. (rus)
13. Ledenev A.A., Kozodaev S.P., Percev V.T., Baranov E.V., Zagorujko T.V., Vnukov D.N. Mechanisms of action of various kinds of organic mineral additives in cement system [Mekhanizmy dejstviya razlichnyh vidov organomineral'nyh dobavok v cementnoj sisteme]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 9. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19 (rus)
14. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S.-A. Prospects for the use of cement industry waste for the production of modern concrete composites [Perspektivnye ispolzovaniya otkhodov tsementnoy promyshlennosti dlya polucheniya sovremennoykh betonnykh kompozitov]. 2021. No. 5. Pp. 55–62. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62 (rus)

15. Amin M., Zeyad A.M., Tayeh B.A., Saad A.I. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete // Construction and Building Materialsater. 2022. Vol. 320. Article number 126233.
16. Lukuttsova N.P., Golovin S.N. Specifics of the Influence of Quartz and Glauconite Sand on the Concrete Strength. Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Vol. 565. Pp. 157–167.
17. Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Gornostaeva E.Yu., Golovin S.N., Zolotukhina N.V. Modeling of the composition of fine-grained concrete with ash and slag mixture and superplasticizer [Modelirovanie sostava melkozernistogo betona s zoloshlakovo smes'yu i superplastifikatorom]. Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya. 2022. No 2 (85). Pp. 71–77. DOI: 10.53980/24131997_2022_2_71 (rus)
18. Martemyanov D., Rudmin M., Zhuravkov S., Korotkova E., Godymchuk A., Haskelberg M., Plotnikov E. Application of ural glauconite for groundwater deironing and demanganation. Journal of Environmental Science and Health. 2021. Vol. 56(8). Pp. 861–866. DOI: 10.1080/10934529.2021.1932171
19. Bruneel Y., Laer L.V., Brassinnes S., Smolders E. Radio caesium sorption on natural glauconite sands is unexpectedly as strong as on Boom Clay. Science of The Total Environment. 2020. Vol. 720. Article number 137392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137392
20. Botsman L.N., Lunev R.S., Ageeva M.S., Nerovnaya S.V. Use of glauconitic sand as a filler in the concrete mixes production. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945(1). Article number 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012081

Information about the authors

Lukuttsova, Natal'ya P. DSc, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Golovin, Sergej N. Master. E-mail: s.n.golovin@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Pykin, Aleksey A. PhD. E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Vorobyev, Artem A. Graduate student. E-mail: landelas73@gmail.com. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Khandozhko, Evgeniy S. Graduate student. E-mail: evgenuy.whereareyou@gmail.com. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Received 12.10.2025

Для цитирования:

Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С. Исследование прочности бетона на кварцево-глауконитовом песке с комплексной добавкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-8-17

For citation:

Lukuttsova N.P., Golovin S.N., Pykin A.A., Vorobyov A.A., Khandozhko E.S. Study of the strength of concrete on quartz-glaucnate sand with a complex additive. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-8-17