СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19

[1,*]Сагадеев Е.В., [2]Сулейманова Л.А., [3]Ибрагимов Р.А., [4]Сагадеев В.В.
[1]ООО «Коррозионное тестирование строительных материалов»
[2]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
[3]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
[4]Казанский национальный исследовательский технологический университет
**E-mail: sagadeev@list.ru*

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ СЕРНЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. *Разработка новых типов строительных материалов, которые могут долгое время эффективно функционировать в различных агрессивных условиях и климатических зонах, представляет собой одно из наиболее важных направлений в современном строительном материаловедении. В рамках проведенного исследования с использованием метода «горячей» технологии было разработано пятьдесят композиций серных бетонов на основе отходов нефтехимической промышленности и теплоэнергетики с возможностью их применения в производстве сборных конструкций (фундаментных и стеновых блоков, фундаментных плит и др.). В процессе работы были изучены физико-механические свойства этих композиций, включая прочность на сжатие, плотность и водопоглощение. Для достижения оптимальных характеристик серных бетонов необходимо включать три основных компонента: техническую серу, кварцевый песок и золошлаковые отходы с различной степенью дисперсности. Оптимальное содержание серы в композициях должно составлять от 40 % до 45 %, от 25 % до 40 % кварцевого песка и от 15 % до 35 % ЗШО по массе для обеспечения максимальных физико-механических показателей. Исследование выявило, что увеличение доли золошлаковых отходов или кварцевого песка приводит к резкому снижению прочности, росту водопоглощения и снижению плотности образцов. Также было исследовано влияние модификатора – силиката натрия – на физико-механические характеристики бетонов. Добавление этого модификатора снижает прочность (в несколько раз), но одновременно уменьшает водопоглощение на 8–10 % и увеличивает плотность на 7–10 %.*

Ключевые слова: *серный бетон, сера, кварцевый песок, золошлаковые отходы, силикат натрия.*

Введение. Как известно, создание новых видов строительных композиционных материалов, способных длительное время эксплуатироваться в различных агрессивных средах и климатических условиях, является одним из актуальных направлений современного строительного материаловедения. Таким композиционным строительным материалом, в частности, является серный бетон, состоящий их инертных заполнителей (с различной степенью прочности и дисперсности), выполняющих роль внутреннего каркаса, и собственно серы, выступающей в качестве связующей композиции с добавками различных модификаторов [1, 2]. Техническая сера, являющаяся многотоннажным отходом нефтехимической отрасли, обладает выдающимися свойствами, такими как гидрофобность, химическая инертность и низкая температура плавления [3, 4]. В серных бетонах расплавленная сера в виде жидкой фазы проникает в поры заполнителей и кристаллизуется при охлаждении, что способствует образованию прочной структуры [4, 5].

Среди основных преимуществ серных бетонов можно выделить несколько ключевых характеристик, которые делают их особенно привлекательными для использования в строительстве. Во-первых, серные бетоны обладают способностью быстро наращивать прочность, что является важным фактором в условиях современного строительства, где время играет критическую роль. Это позволяет значительно сократить сроки выполнения строительных работ и повысить общую эффективность процессов.

Во-вторых, серные бетоны демонстрируют высокую морозостойкость, что делает их идеальными для эксплуатации в регионах с суровыми климатическими условиями. Они способны сохранять свои механические свойства даже при низких температурах, что обеспечивает надежность конструкций в зимний период. Кроме того, серные бетоны устойчивы к химическим воздействиям, что позволяет им успешно использоваться в агрессивных средах, таких как промышленные зоны или места с повышенной кислотностью.

Еще одним значительным преимуществом является возможность затвердевания серных бетонов при отрицательных температурах и под водой. Это открывает новые горизонты для их применения в строительстве мостов, дамб и других

объектов, где традиционные бетонные смеси могут не справиться с условиями окружающей среды.

Серные бетоны также характеризуются низким водопоглощением и теплопроводностью. Низкое водопоглощение делает их менее подверженными воздействию влаги и предотвращает образование трещин и разрушений, связанных с замерзанием воды внутри материала. Низкая теплопроводность способствует улучшению теплоизоляционных свойств конструкций, что делает их более энергоэффективными.

Эти характеристики делают серные бетоны эффективными в различных условиях эксплуатации, включая как жилые, так и промышленные здания. Их использование может привести к снижению затрат на обслуживание и ремонт, а также к увеличению срока службы конструкций.

В последние годы наблюдается значительный интерес к серным бетонам, которые разрабатываются с целью решения проблем, связанных с низкой прочностью и долговечностью традиционных цементных бетонов в агрессивных условиях эксплуатации [6, 7]. Исследования показывают, что серные бетоны обладают высокой коррозионной стойкостью, малым водопоглощением и способностью быстро набирать прочность, что делает их конкурентоспособными по сравнению с обычными цементными материалами [4, 8–10].

Тем не менее, несмотря на свои преимущества, серные бетоны имеют ряд недостатков. Одним из основных является их низкая термостойкость и высокая горючесть; при температуре около 120 °С серные бетоны начинают плавиться и выделять двуокись серы, что ограничивает их применение в условиях высокой температуры [11, 12]. Кроме того, серные бетоны могут быть подвержены трещинообразованию при укладке больших объемов из-за термических напряжений [11]. Эти недостатки требуют дальнейшего изучения и модификации составов серного бетона для улучшения его эксплуатационных характеристик.

Современные исследования направлены на использование различных активированных наполнителей для улучшения свойств серного бетона. Например, учеными [9] исследовано влияние активированных наполнителей на прочность и устойчивость серного полимерного бетона, выявив возможность значительного улучшения его характеристик. Также рассматриваются возможности применения отходов нефтехимической промышленности как наполнителей для серных бетонов, что не только улучшает их свойства, но и способствует утилизации промышленных отходов [13].

Добавление золошлаковых отходов (ЗШО) может существенно повысить эксплуатационные характеристики серного бетона. Использование ЗШО позволяет уменьшить выделение летучих газов при приготовлении серобетонов в результате связывания части выделяемых газов щелочными компонентами зол. Это особенно важно в контексте повышения устойчивости бетона к агрессивным химическим веществам и воздействиям окружающей среды [14]. Однако в настоящее время недостаточно изучены механизмы взаимодействия ЗШО с серным вяжущим, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований.

Кроме того, использование золошлаковых отходов способствует решению проблемы утилизации техногенных отходов, что является важным аспектом устойчивого развития. В условиях растущих объемов производства таких отходов их переработка и использование в строительстве могут значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, целью данного исследования является разработка состава серного бетона с добавлением отходов промышленности, что позволит не только улучшить физико-механические характеристики материалов, но и решить проблему утилизации промышленных отходов.

Материалы и методы. Для создания композиций серных бетонов в исследовании были использованы следующие материалы:

Техническая сера – отход производства Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода и соответствует требованиям ГОСТ 127.1-93. По химическому составу отход представляет собой товарный продукт, содержащий 99,9 % серы.

Строительный кварцевый песок Камско-Устьинского месторождения Республики Татарстан с модулем крупности 2,7, соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014.

Золошлаковые отходы (ЗШО), применяемые в качестве наполнителя, получены от Казанской ТЭЦ-2 и соответствуют требованиям ГОСТ 25592-2019. Химический состав ЗШО (масс. %): SiO_2 – 47,7-52,2; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 21,24-25,28; Fe_2O_3 – 5,2-5,9; $CaO + MgO$ – 4,3; $K_2O + Na_2O$ – 1,84-19,03. Средняя влажность ЗШО составляет 25–28 %, объемная насыпная плотность в сухом состоянии 2200 кг/м^3, удельная поверхность 2890 см^2/г.

Образцы серных бетонов были созданы с применением технологии, известной как «горячая» технология. В процессе их производства все исходные материалы – сера, кварцевый песок и ЗШО – предварительно нагревались до темпера-

туры около 140 ± 5 °С перед тем, как смешиваться в заданных пропорциях. Такой метод позволяет расплавить серу, что делает ее более удобной для дальнейшей обработки и обеспечивает лучшую адгезию между компонентами.

После этого горячая смесь серобетона заливается в разогретые до температуры 140 ±5 °С металлические формы размером 20×20×20 мм. После заливки образцы проходят процесс застывания и кристаллизации при комнатной температуре, что способствует образованию прочной структуры бетона. Кристаллизация образцов серных бетонов происходит в процессе их твердения при охлаждении расплавленной серы, которая затвердевает и образует прочную структуру.

В ходе исследования были изготовлены и проанализированы композиции серных бетонов, состоящие из пятидесяти различных вариантов с соотношением компонентов «сера : кварцевый песок : ЗШО». Содержание кварцевого песка и ЗШО в образцах варьируется от 0 до 70 %. 25 композиций дополнительно содержат модификатор – силикат натрия Na_2SiO_3 (жидкое натриевое стекло), соответствующий требованиям ГОСТ 13078-2021.

Испытания на прочность при сжатии образцов композиций серных бетонов проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 на лабораторном гидравлическом прессе ПСУ-10. Плотность образцов определялась согласно ГОСТ 12730.1-2020, а водопоглощение – по стандарту ГОСТ 12730.3-2020.

Основная часть. Для изучения физико-механических характеристик серных бетонов была оценена прочность на сжатие образцов (рис. 1).

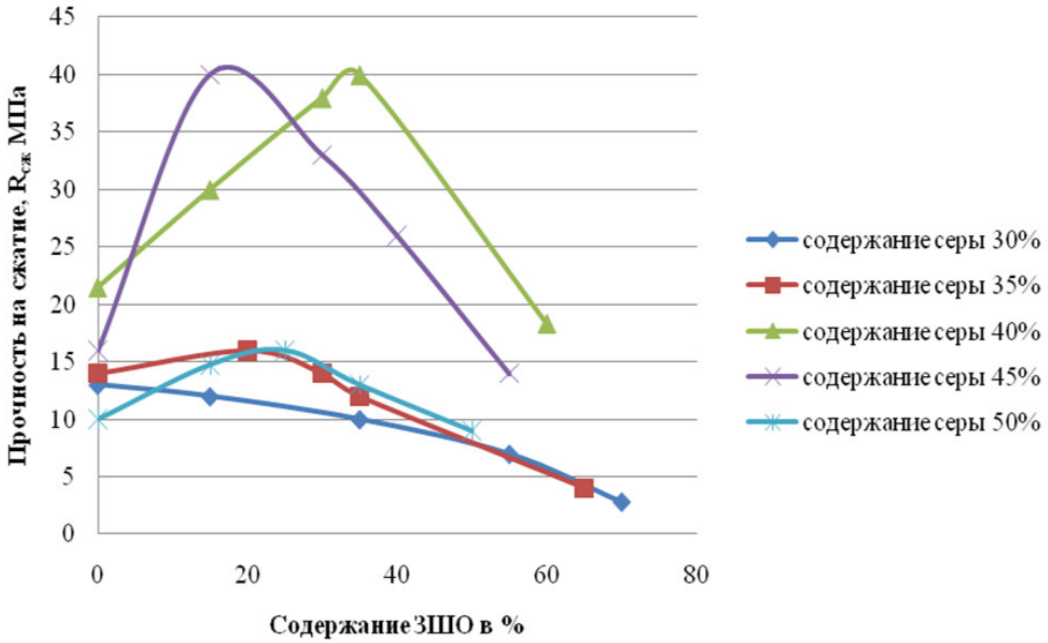

Рис. 1. Зависимость изменения прочности на сжатие серных бетонов от содержания ЗШО в образцах

Оптимальное содержание технической серы в композициях, содержащих кварцевый песок и ЗШО, для достижения высоких прочностных показателей составляет 40–45 % по массе (рис. 1). Эти пропорции обеспечивают эффективное связывание компонентов и формирование прочной структуры бетона. В то же время содержание серы менее 40 и более 45 %, в рамках изученного диапазона 30–50 %, не обеспечивает необходимую прочность для строительных материалов.

Следует отметить, что в научной литературе вопрос о содержании серы в бетонных композициях остается предметом активного обсуждения. Различные исследования показывают широкий диапазон оптимального содержания серы: от 10–15 % по массе до более высоких значений – до 50 %. Так, согласно различным источникам, оптимальное содержание серы в бетоне составляет 10-15% по массе, в других работах [15, 16] – 16 %, [17] – 21 %, [18] – 25 %, [19] – менее 50 %, а согласно [4] – от 30 до 50 %.

Применение двух видов заполнителей с различной степенью дисперсности – кварцевого песка и золошлаковых отходов – приносит серным бетонам ряд преимуществ. Когда ЗШО с высокой дисперсностью добавляются к кварцевому песку с более крупными зернами, мелкие частицы ЗШО эффективно заполняют пустоты между большими зернами песка. Это способствует уплотнению смеси и улучшает ее общую структуру. Пористость бетона является ключевым фактором, который непосредственно влияет на его прочность и долговечность. Чем больше пустот присутствует в материале, тем ниже его прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

При добавлении расплава серы в смесь песка и ЗШО расплав проникает в оставшиеся микропустоты. Этот процесс способствует формированию более упорядоченной структуры серного бетона и значительно улучшает его физико-механические свойства. Однако стоит отметить, что с увеличением доли ЗШО в композициях наблюдается значительное снижение прочности на сжатие образцов бетонов в связи с ухудшением взаимодействия между компонентами смеси (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики композиций серных бетонов

№ композиции	Состав, мас. %			Прочность на сжатие, МПа	Плотность, г/см^3	Водопоглощение, % по массе
	сера	песок	ЗШО			
1	30	70	0	13	2,20	1,60
2		55	15	12	1,90	2,80
3		35	35	10	1,60	8,00
4		15	55	7	1,35	14,50
5		0	70	3	1,24	19,66
6	35	65	0	14	1,95	0,73
7		45	20	16	2,20	0,60
8		35	30	14	2,15	0,70
9		30	35	12	2,10	0,90
10		0	65	4	1,38	8,61
11	40	60	0	22	2,10	0,82
12		45	15	30	2,20	0,55
13		30	35	36	2,25	0,49
14		25	40	40	2,31	0,53
15		0	60	18	1,62	3,43
16	45	55	0	16	2,10	0,84
17		40	15	40	2,28	0,64
18		25	30	33	2,22	0,50
19		15	40	26	2,10	0,55
20		0	55	14	1,67	2,46
21	50	50	0	10	2,10	1,84
22		35	15	15	2,08	0,80
23		25	25	16	2,03	0,60
24		15	35	13	1,95	0,70
25		0	50	9	1,76	0,86

Среди всех исследованных композиций серных бетонов наилучшие прочностные характеристики были продемонстрированы эмпирически подобранными композициями № 14 и № 17. Композиция № 5 показала наименьшие значения прочности на сжатие среди всех исследованных образцов № 1-25.

Снижение прочности также фиксируется при увеличении доли кварцевого песка в составах композиций в связи с увеличением доли крупнодисперсного заполнителя в смесях, что приводит к образованию пустот в структуре бетона.

Зависимости изменения плотности от содержания ЗШО, представлены на рис. 2.

Композиции с низкими прочностными характеристиками, содержащие максимальное количество ЗШО, демонстрируют наименьшие значения плотности в исследуемом диапазоне (рис. 2). Это может быть связано с тем, что добавление значительного количества ЗШО приводит к увеличению пористости материала, что негативно сказывается на его прочностных свойствах.

Следует отметить, что серные бетоны, не содержащие ЗШО, имеют повышенные показатели плотности образцов, как показано на рис. 2 и в табл. 1. В композициях 1, 6, 11, 16 и 21 пустоты между зернами песка заполняются расплавленной серой, но ее кристаллизация увеличивает хрупкость и снижает прочность связей с песком. При этом изменение содержания серы практически не влияет на плотность бетонов.

Зависимости изменения водопоглощения от содержания ЗШО представлены на рис. 3.

Относительно высокие показатели водопоглощения наблюдаются у композиций с низкими прочностными характеристиками и плотностью. Эта тенденция особенно ярко проявляется в образцах, содержащих максимальное количество ЗШО, которые имеют высокую степень дисперсности. Подобное поведение также наблюдается у

серных композиций с высоким содержанием кварцевого песка, как указано в табл. 1.

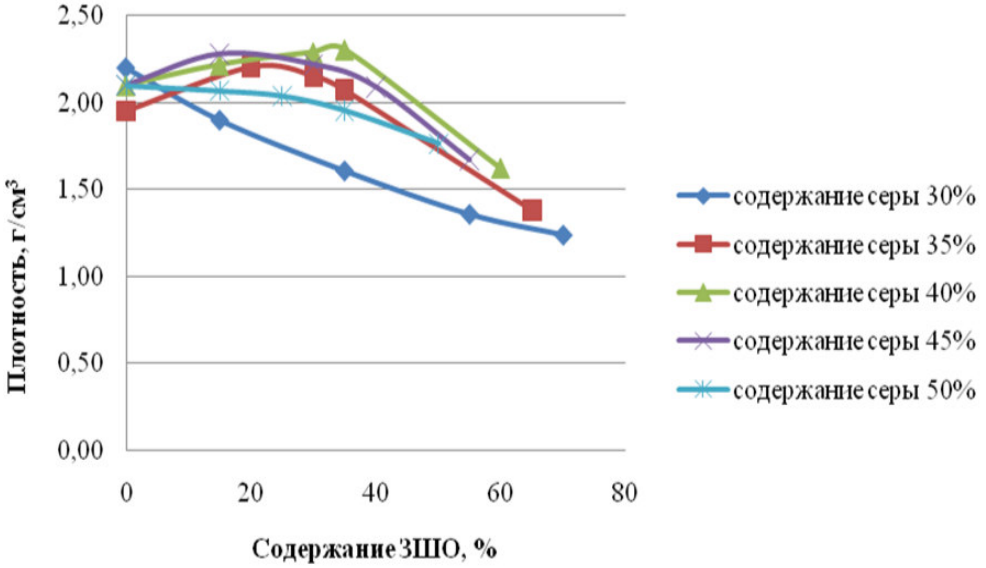

Рис. 2. Зависимость изменения плотности серных бетонов от содержания ЗШО в образцах

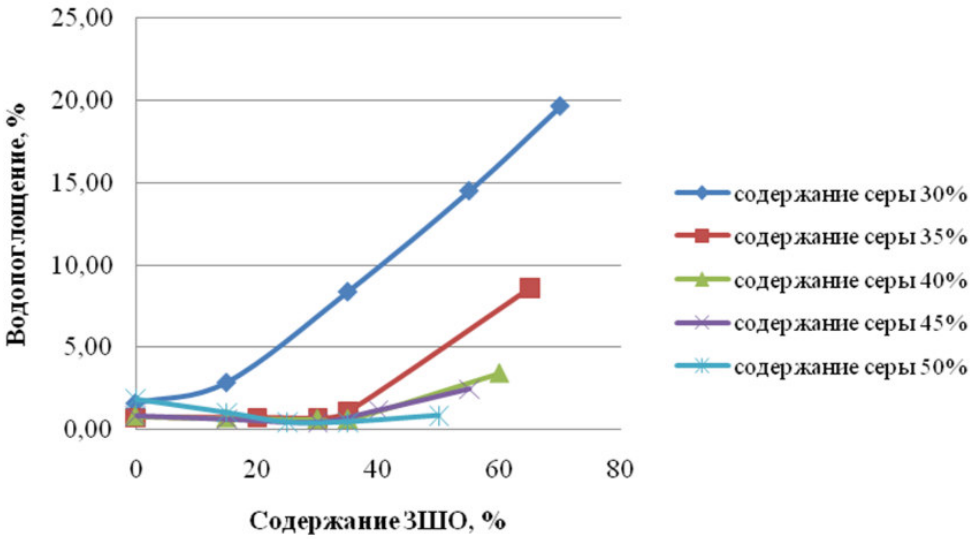

Рис. 3. Зависимость изменения водопоглощения серных бетонов от содержания ЗШО в образцах на шестые сутки проведения испытаний

Анализ экспериментальных данных показывает, что композиция № 5, обладающая наименьшей прочностью на сжатие среди всех исследованных образцов в диапазоне от № 1 до № 25, также имеет самое высокое значение водопоглощения среди всех серных бетонов.

Увеличение пористости связано с введением большого количества заполнителя с высокой степенью дисперсности, ограничивающим формирование более упорядоченной структуры серного бетона, что негативно влияет как на плотность (рис. 2), так и на водопоглощение (рис. 3).

Для улучшения свойств серных бетонов в их состав часто вводят различные модификаторы или активаторы. Эти добавки могут значительно изменить физико-механические характеристики бетона, улучшая его прочность и устойчивость к внешним воздействиям [1, 20]. В работе в качестве модификатора серных бетонов использован силикат натрия (жидкое стекло) широко применяющийся в строительном материаловедении с целью модификации свойств материалов. При введении модификатора жидкого стекла вязкость серного расплава несколько понижается в широком температурном интервале, что свидетельствует о существовании короткоцепных радикалов и отсутствии полимеризации даже при более высоких температурах. Таким образом, происходит повышение пропитывающей способности расплава в более широком температурном интервале и на поверхности бетона формируется более плотный защитный слой [20].

Зависимости изменения прочности на сжатие серных бетонов с модификатором силикатом натрия показаны на рис. 4

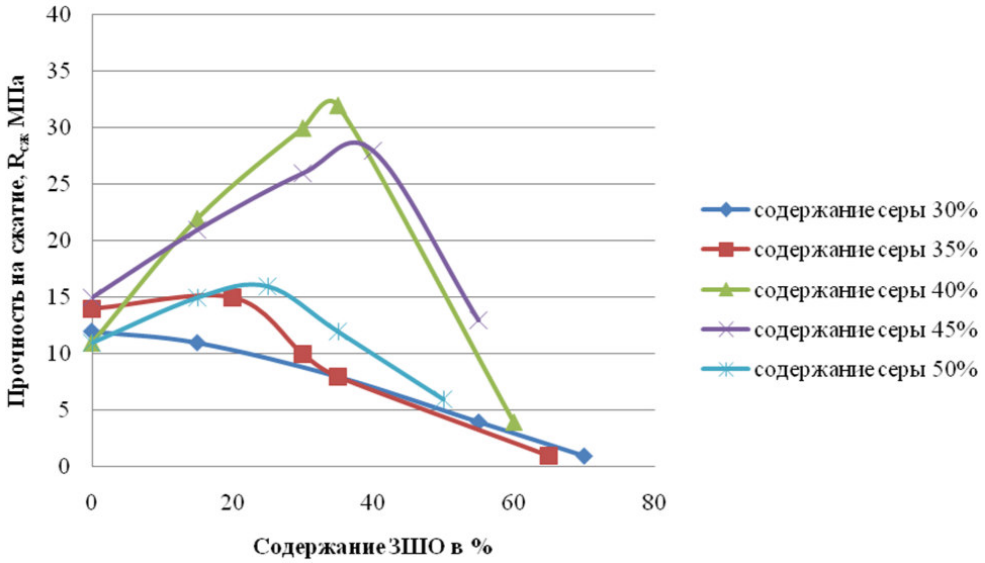

Рис. 4. Зависимость изменения прочности на сжатие серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗШО в образцах

Как и ожидалось, с увеличением содержания ЗШО в составе композиций наблюдается резкое снижение прочности на сжатие образцов бетонов, что подтверждается данными табл. 2. Это снижение прочности также фиксируется при увеличении доли кварцевого песка в составах, что дополнительно подтверждает взаимосвязь между составом бетона и его прочностными характеристиками. В результате модифицированные композиции № 30 и 35 оказались с наименьшей прочностью на сжатие среди всех исследованных серных бетонов в диапазоне от № 1 до № 50.

Таблица 2

Физико-механические характеристики композиций серных бетонов с добавлением Na_2SiO_3

№ композиции	Состав, мас. %			Прочность на сжатие, МПа	Плотность, г/см^3	Водопоглощение, % по массе
	сера	песок	ЗШО			
26	30	70	0	12	2,40	1,50
27		55	15	11	2,05	2,50
28		35	35	8	1,75	7,70
29		15	55	4	1,45	13,20
30		0	70	1	1,30	17,69
31	35	65	0	14	2,13	0,67
32		45	20	15	2,40	0,45
33		35	30	10	2,30	0,55
34		30	35	5	2,20	0,75
35		0	65	1	1,48	8,05
36	40	60	0	11	2,23	0,77
37		45	15	22	2,35	0,65
38		30	30	30	2,40	0,51
39		25	35	32	2,50	0,57
40		0	60	4	1,74	3,26
41	45	55	0	15	2,19	0,82
42		40	15	21	2,50	0,80
43		25	30	26	2,37	0,65
44		10	45	28	2,45	0,70
45		0	55	13	1,79	2,24
46	50	50	0	11	2,21	1,75
47		35	15	15	2,20	0,90
48		25	25	16	2,18	0,55
49		15	35	12	2,12	0,65
50		0	50	6	1,92	0,82

Примечание: Na_2SiO_3 вводилось сверх 100 % в количестве 1 % от массы серы.

Сравнение прочностных характеристик модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций, в которых модификатор не использовался, показало, что добавление силиката натрия значительно снижает прочность бетонов – это снижение наблюдается в несколько раз.

Сравнительные данные о влиянии содержания ЗШО на плотность серных бетонов представлены на рис. 5.

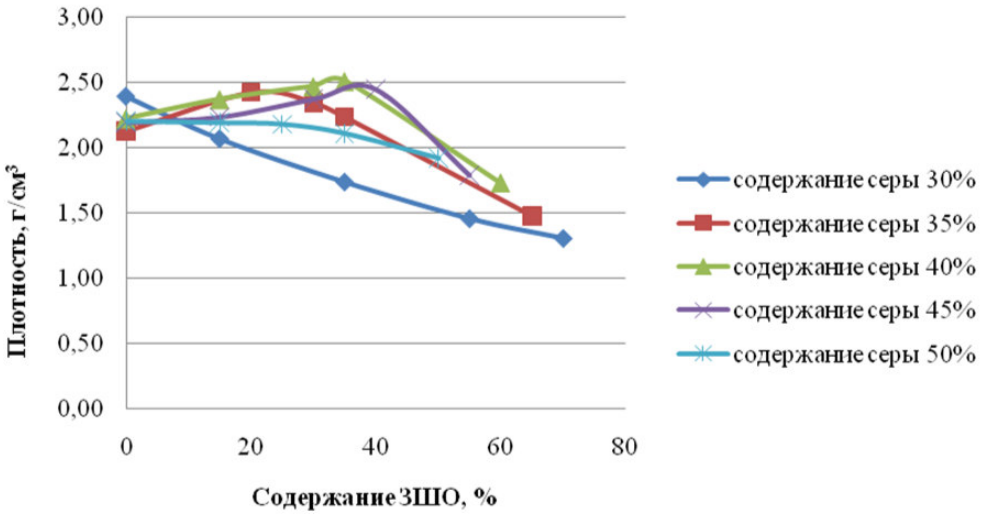

Рис. 5. Зависимость изменения плотности серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗШО в образцах

Композиция № 39, обладающая наивысшей прочностью на сжатие среди всех исследованных образцов, демонстрирует максимальное значение плотности – 2,51 г/см³ в диапазоне композиций № 26-50, как показано на рис. 5. Это свидетельствует о том, что данная композиция не только обладает высокими прочностными характеристиками, но и высокой плотностью, что может быть связано с оптимальным соотношением компонентов в ее составе. Высокая плотность указывает на более компактную структуру бетона, что способствует его прочности и устойчивости к внешним воздействиям.

Низкая плотность этих образцов указывает на то, что увеличение доли ЗШО более 45% в составе композиций негативно сказывается на их плотности (табл. 2). Это может быть объяснено тем, что добавление значительного количества ЗШО при приводит к увеличению пористости бетона, так как мелкие частицы заполнителя препятствуют формированию более упорядоченной структуры серного бетона.

Аналогично, серные бетоны, которые не содержат ЗШО, характеризуются повышенными показателями плотности образцов. Это может быть связано с тем, что в таких композитах пустоты между зернами песка заполняются расплавленной серой.

Таким образом, модифицированная композиция № 30, которая имеет минимальные показатели прочности на сжатие среди всех исследованных серных бетонов, также демонстрирует наименьшую плотность среди композиций № 26-50. Это подчеркивает важность выбора компонентов и их соотношений для достижения желаемых физико-механических свойств. Правильное сочетание серы, кварцевого песка и ЗШО является ключевым фактором для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик бетона.

Сравнение плотности модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций без модификатора показало, что добавление силиката натрия увеличивает плотность образцов на 7-10%. Это может быть связано с тем, что силикат натрия способствует улучшению структуры бетона и заполняет пустоты между частицами заполнителей.

Зависимости изменения водопоглощения от содержания ЗШО представлены на рис. 6.

Композиция № 39 серных бетонов с наивысшей прочностью на сжатие также имеет самое низкое водопоглощение – 0,57 % (рис. 6). Это свидетельствует о том, что высокая прочность на сжатие может быть связана с более плотной структурой бетона, которая препятствует проникновению влаги. В то же время композиции с низкими прочностными характеристиками, содержащие максимальное количество ЗШО, показывают более высокие показатели водопоглощения в исследуемом диапазоне, что подтверждается данными табл. 2. Подобная тенденция наблюдается и у серных композиций с высоким содержанием кварцевого песка.

Кроме того, стоит отметить, что модифицированная композиция № 30, имеющая минималь-

ные показатели прочности на сжатие, характеризуется самым высоким значением водопоглощения среди композиций № 26-50.

Сравнение водопоглощения модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций без модификатора показало, что добавление силиката натрия снижает водопоглощение образцов на 8-10%.

Таким образом, анализируя полученный массив физико-механических данных образцов композиций № 26-50, содержащих силикат натрия, можно наблюдать те же закономерности, отмеченные выше для не модифицированных серных бетонов (композиции № 1-25).

Исследования показывают, что, согласно ГОСТ Р 59613-2021, разработанные композиции № 14, 17 и 39 могут быть отнесены к серобетонным смесям средней плотности для тяжелого серобетона.

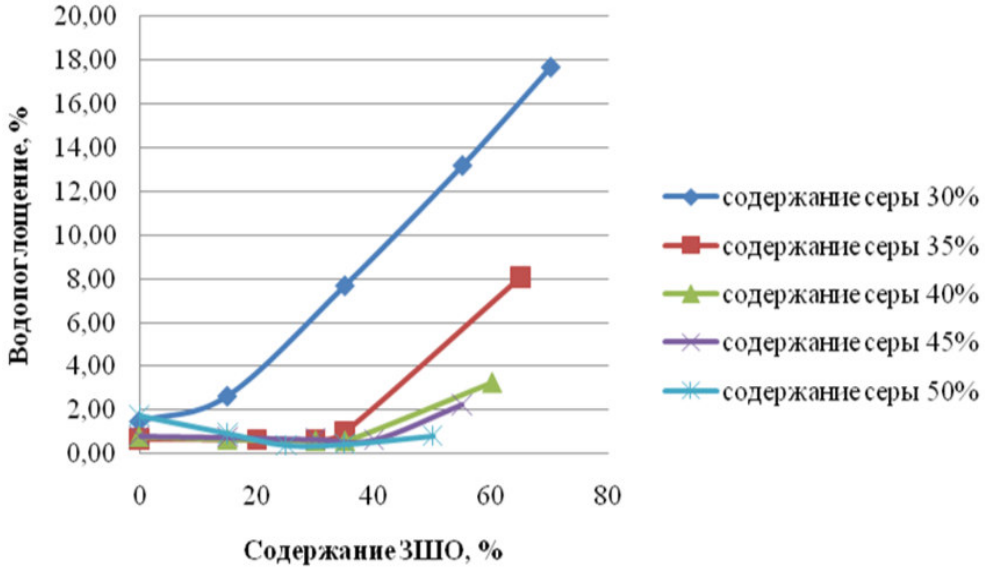

Рис. 6. Зависимость изменения водопоглощения серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗШО в образцах на шестые сутки проведения испытаний

Выводы.

Оптимальное содержание серы в композициях для достижения максимальной прочности на сжатие составляет 40–45 % по массе. При этом увеличение доли ЗШО или кварцевого песка приводит к снижению прочности, что связано с увеличением пористости и образованием пустот в структуре бетона.

Среди пятидесяти исследованных композиций серных бетонов наилучшие прочностные характеристики демонстрируют эмпирически подобранные смеси, содержащие от 40 до 45 % серы, от 25 до 40 % кварцевого песка и от 15 до 35 % ЗШО.

Применение двух типов заполнителей с различной дисперсностью (кварцевый песок и ЗШО) способствует улучшению структуры серного бетона. Мелкие частицы ЗШО заполняют промежутки между крупными зернами песка, что ведет к уплотнению смеси и повышению прочности.

Высокие значения водопоглощения наблюдаются у композиций с низкими прочностными характеристиками, особенно при высоком содержании ЗШО. Это указывает на негативное влияние увеличенной пористости на физико-механические свойства бетона, что может привести к ухудшению его долговечности.

Введение модификаторов, таких как силикат натрия, позволяет значительно изменить физико-механические характеристики серных бетонов, уменьшая водопоглощение на 8–10 % и увеличивая плотность на 7–10 % по сравнению с образцами без модификатора. Однако увеличение содержания ЗШО в модифицированных композициях также приводит к снижению прочности на сжатие.

Результаты исследований открывают новые возможности для применения серных бетонов в строительстве и других отраслях, где требуются материалы с высокой прочностью и низким водопоглощением, таких как фундаментных и стеновых блоков, фундаментных плит и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yusupova A., Ahmetova R., Bobrishev A. Sulfur concrete made from sulfur waste of petrochemical plants and silica containing compounds // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2333–2336. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.682

2. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Sulfur concrete for the construction industry: A sustainable development approach. Fort Lauderdale, FL, USA: J. Ross Publishing Inc. 2010. 448 p.

3. Усов Б.А. Технология и применение серных бетонов // Системные технологии. 2015. № 17. С. 56–69.

4. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии. Технические науки. 2018. № 11. С. 43–47.

5. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V., Vatin N. A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. Materials. 2020. Vol. 13. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712

6. Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.Dj., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 3926–3934. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024

7. Shin M., Kim K., Gwon Seong-Woo, Cha S. Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 69. Pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061

8. Yang Ch., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S. An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. Pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.046

9. Moon Ju., Kalb P.D., Milian L., Northrup P.A. Characterization of a sustainable sulfur polymer concrete using activated fillers // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 67. Pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.002

10. Mohammed Sh., Poornima V. Strength and durability study of sulphur concrete with replaced fine aggregate // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 11. Pp. 23888–23897. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.181

11. Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S. Potential for producing concrete blocks using sulphur polymeric concrete in Kuwait // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2019. Vol. 31. Pp. 327–331. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004

12. Khademi A.Gh., Sar H.I.K. Comparison of sulfur concrete, cement concrete and cement-sulfur concrete and their properties and application // Current World Environment. 2015. Vol. 10. Sp. Pp. 201–207. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.26

13. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Pp. 186–194.

14. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии. Технические Науки. 2018. № 11. С. 43–47.

15. Balabanov V., Baryshok V., Epishkin N. Concrete based on sulfur binder being modified with inorganic additives // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 212. 01013. DOI: 10.1051/matecconf/201821201013

16. Занг Ле Ньят Тхюи, Епишкин Н.А., Балабанов В.Б., Барышок В.П. Высокопрочные и морозостойкие бетоны с применением технической серы // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Том 8. № 3. С. 122–129. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-122-129

17. Сафаров А.Х., Московец А.В., Федорова Ю.А., Ягафарова Г.Г., Акчурина Л.Р. Экологически безопасный состав серобетона // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 11. С. 199–200.

18. Занг Ле Ньят Тхюи, Епишкин Н.А., Балабанов В.Б., Барышок В.П. Высокопрочные бетоны на основе серного вяжущего с применением модификаторов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Том 7. № 4. С. 155–161. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-4-155-161

19. Токтибаева Х.Р., Бекжигитова К.А., Джаппарова М.Т., Сатывалдиев А.С., Имангалиев Т.А., Серкебаев М.К. Получение серного бетона из комовой серы – отхода добычи углеводородного сырья // Фундаментальные исследования. Химические науки. 2015. № 2 (часть 16). С. 3527–3531.

20. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Пятко Ю.Н., Ефимова В.А., Ахметова А.Ю., Диргамова Л.Р. Электрофильные и нуклеофильные модификаторы для повышения пропитывающих свойств серного расплава в технологии водостойких теплоизоляционных материалов // Вестник технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 66–68.

Информация об авторах
Сагадеев Евгений Владимирович, доктор химических наук, профессор. E-mail: sagadeev@list.ru. Общество с ограниченной ответственностью «Коррозионное тестирование строительных материалов». Россия, 420140, Казань, ул. Минская, д. 52, офис 110.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор заведующая кафедрой Строительства и городского хозяйства. E-mail: sgx@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ибрагимов Руслан Абдирашитович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Технологии строительного производства. E-mail: rusmag007@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Сагадеев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры Инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования. E-mail: v.sagadeev@mail.ru. Казанский национальный исследовательский технологический университет. Россия, 420015, Казань, ул. К. Маркса, д. 68.

Поступила 18.01.2025 г.
© Сагадеев Е.В., Сулейманова Л.А., Ибрагимов Р.А., Сагадеев В.В., 2025

[1,*]Sagadeev E. V., [2]Suleymanova L. A., [3]Ibragimov R. A., [4]Sagadeev V. V.
[1]LLC «Korrosionnoe testirovanie stroitelnih materialov»
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
[3]Kazan State University of Architecture and Engineering
[4]Kazan National Research Technological University
E-mail: sagadeev@list.ru

OBTAINING AND STUDYING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SULFUR CONCRETE COMPOSITIONS

Abstract: *The development of new types of building materials that can function effectively for a long time in various aggressive conditions and climatic zones is one of the most important areas in modern construction materials science. As part of the study, fifty sulfur concrete compositions based on petrochemical and thermal power industry waste were developed using the "hot" technology method. In the process, the physical and mechanical properties of these compositions were studied, including compressive strength, density and water absorption. To achieve optimal characteristics of sulfur concrete, it is necessary to include three main components: technical sulfur, quartz sand and ash and slag waste with varying degrees of dispersion. The optimal sulfur content in the compositions should be 40 % or 45 % by weight to ensure maximum physical and mechanical properties. The study revealed that an increase in the proportion of ash and slag waste or quartz sand leads to a sharp decrease in the strength of the samples. Increasing the proportion of ash and slag waste in sulfur concretes leads to a significant increase in water absorption and a decrease in density, which is explained by an increase in the porosity of the samples. The effect of the modifier - sodium silicate - on the physical and mechanical properties of concrete was also studied. Adding this modifier reduces strength (several times), but at the same time reduces water absorption by 8–10 % and increases density by 7–10 %. In conclusion, the results of the study emphasize the importance of the composition for the physical properties of sulfur concretes and open up opportunities for their use in construction.*

Keywords: *sulfur concrete, sulfur, quartz sand, ash and slag waste, sodium silicate.*

REFERENCES

1. Yusupova A., Akhmetova R., Bobrishev A. Sulfur concrete made from sulfur waste of petrochemical plants and silica containing compounds. Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2333–2336. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.682

2. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Sulfur concrete for the construction industry: A sustainable development approach. Fort Lauderdale, FL, USA: J. Ross Publishing Inc. 2010. 448 p.

3. Usov B.A. Technology and application of sulfur concrete [Tekhnologiya i primenenie sernyh betonov]. System technologies. 2015. No. 17. Pp. 56-69. (rus)

4. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Yusupova A.A. Utilization of ash and slag waste from thermal power plants in the manufacture of sulfur concrete in the presence of phosphorus chloride [Utilizaciya zoloshlakovyh othodov TEC pri izgotovlenii sernyh betonov v prisutstvii hlorida

fosfora]. Modern science-intensive technologies. Engineering sciences. 2018. No. 11. Pp. 43-47. (rus)

5. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V., Vatin N. A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. Materials. 2020. Vol. 13. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712

6. Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.Dj., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 3926–3934. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024

7. Shin M., Kim K., Gwon Seong-Woo, Cha S. Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 69. Pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061

8. Yang Ch., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S. An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. Pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.046

9. Moon J., Kalb P.D., Milian L., Northrup P.A. Characterization of a sustainable sulfur polymer concrete using activated fillers. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 67. Pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.002

10. Mohammed Sh., Poornima V. Strength and durability study of sulfur concrete with replaced fine aggregate. Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 11.Pp. 23888–23897. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.181

11. Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S. Potential for producing concrete blocks using sulfur polymeric concrete in Kuwait. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2019. Vol. 31. Pp. 327–331. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004

12. Khademi A.Gh., Sar H.I.K. Comparison of sulfur concrete, cement concrete and cement-sulfur concrete and their properties and application. Current World Environment. 2015. Vol. 10. Sp. Pp. 201–207. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.26

13. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete. Cement and Concrete Composites. Vol. 31. 2009. Pp. 186–194.

14. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Yusupova A.A. Utilization of ash and slag waste from thermal power plants in the manufacture of sulfur concretes in the presence of phosphorus chloride [Utilizaciya zoloshlakovyh othodov TEC pri izgotovlenii sernyh betonov v prisutstvii hlorida fosfora]. Modern science-intensive technologies. Technical Sciences. 2018. No. 11. Pp. 43–47.

15. Balabanov V., Baryshok V., Epishkin N. Concrete based on sulfur binder being modified with inorganic additives. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 212. 01013. DOI: 10.1051/matecconf/201821201013

16. Giang Le Nhat Thuy, Epishkin N.A., Balabanov V.B., Baryshok V.P. High-strength and frost-resistant concretes using technical sulfur [Vysokoprochnye i morozostojkie betony s primeneniem tekhnicheskoj sery]. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2018. Vol. 8. No. 3. Pp. 122–129. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-122-129 (rus)

17. Safarov A.Kh., Moskovets A.V., Fedorova Yu.A., Yagafarova G.G., Akchurina L.R. Environmentally friendly composition of sulfur concrete [Ekologicheski bezopasnyj sostav serobetona]. Bulletin of the Technological University. 2016. Vol. 19. No. 11. Pp. 199–200. (rus)

18. Zang Le Nhat Thuy, Epishkin N.A., Balabanov V.B., Baryshok V.P. High-strength concretes based on sulfur binder with the use of modifiers [Vysokoprochnye betony na osnove sernogo vyazhushchego s primeneniem modifikatorov]. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 155–161. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-4-155-161 (rus)

19. Toktibaeva Kh.R., Bekzhigitova K.A., Dzhapparova M.T., Satyvaldiev A.S., Imangaliev T.A., Serkebaev M.K. Obtaining sulfur concrete from lump sulfur – a waste product of hydrocarbon raw materials extraction [Poluchenie sernogo betona iz komovoj sery – othoda dobychi uglevodorodnogo syr'ya]. Fundamental research. Chemical sciences. 2015. No. 2 (part 16). Pp. 3527–3531. (rus)

20. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Pyatko Yu.N., Efimova V.A., Akhmetova A.Yu., Dirgamova L.R. Electrophilic and nucleophilic modifiers for improving the impregnating properties of sulfur melt in the technology of waterproof thermal insulation materials [Elektrofil'nye i nukleofil'nye modifikatory dlya povysheniya propityvayushchih svojstv sernogo rasplava v tekhnologii vodostojkih teploizolyacionnyh materialov]. Bulletin of the Technological University. 2014. Vol. 17. No. 7. Pp. 66–68. (rus)

Information about the authors

Sagadeev, Evgeniy V. Doctor of Chemical Sciences, Professor. E-mail: sagadeev@list.ru. LLC «Korrosionnoe testirovanie stroitelnih materialov». Russia, 420140, Kazan, st. Minskaya, 52, office 110.

Suleymanova, Ludmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction and urban management. E-mail: sgx@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ibragimov, Ruslan A. PhD, Assistant professor, Head of the Department of Construction production technologies. E-mail: rusmag007@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Sagadeev, Vladimir V. PhD, Assistant professor, Department of Engineering computer graphics and computer-aided design. E-mail: v.sagadeev@mail.ru. Kazan National Research Technological University. Russia, 420015, Kazan, st. Karl Marx, 68.

Received 18.01.2025

Для цитирования:
Сагадеев Е.В., Сулейманова Л.А., Ибрагимов Р.А., Сагадеев В.В. Получение и исследование физико-механических свойств композиций серных бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19

For citation:
Sagadeev E.V., Suleymanova L.A., Ibragimov R.A., Sagadeev V.V. Obtaining and studying physical and mechanical properties of sulfur concrete compositions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No.7. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19