

УДК 678.643.425.033:620.193.8

Строганов Виктор Федорович

доктор химических наук, профессор

E-mail: svf08@mail.ru

Сагадеев Евгений Владимирович

доктор химических наук, профессор

E-mail: sagadeev@list.ru

Потапова Людмила Ильинична

кандидат химических наук, доцент

E-mail: ludmilapo@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Мухаметзянов Марат Айдарович

начальник производственно-технического отдела

E-mail: maratmukhametzyanov@yandex.ru

ООО компания «Ворота»

Адрес организации: 420033, Россия, г. Казань, ул. Богатырева, д. 7а

Получение и исследование свойств серных бетонов на основе техногенных отходов нефтехимического и теплоэнергетического комплексов

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования - изготовление композиций и образцов серных бетонов, изучение их физико-химических характеристик и оценка биостойкости.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в изготовлении ряда композиций серных бетонов, в определении их физико-химических характеристик и в проведении кинетических исследований по определению биостойкости серных бетонов.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что, в результате проведенных исследований, получены серные бетоны с высокими прочностными характеристиками, изучены их физико-химические свойства (плотность, водопоглощение), определена биостойкость и сделаны выводы о влиянии химического состава композиций на свойства серных бетонов и возможность их практического применения.

Ключевые слова: сера, кварцевый песок, золошлаковые отходы, прочность, плотность, водопоглощение, биостойкость

Введение

Как известно, в настоящее время весьма актуальна экологическая проблема утилизации промышленных отходов. Так, например, многотоннажным отходом нефте- и газоперерабатывающего комплекса России является техническая сера. В частности, в РФ ежегодно при обессеривании добываемых нефти и газа образуется более 12 млн тонн серных отходов нефтегазового комплекса [1]. Так в Татарстане ежегодно образуется более 300 тыс. тонн серных отходов на Минибаевском газоперерабатывающем и свыше 200 тыс. тонн серы на Нижнекамском нефтеперерабатывающем заводах [2]. Также одно из первых мест по объемам среди промышленных техногенных отходов занимают золы и шлаки от сжигания на ТЭЦ твердых видов минерального топлива (каменный уголь, горючие сланцы). Например, ежегодно в России образуется около 70 млн тонн золошлаковых отходов (ЗШО) [2]. В России ЗШО являются постоянным источником загрязнения воздушного и водного бассейнов, так как занимают значительные территории (более 200 тыс. га). С учетом того, что в настоящее время более 70 % всей тепловой и электрической энергии в РФ вырабатывается на предприятиях промышленной теплоэнергетики, работающих на твердых видах топлива, рост количества ЗШО будет продолжаться, а, следовательно, будет усиливаться их отрицательное воздействие на экологию страны. Утилизация ЗШО является одной из актуальных экологических

проблем современности, так как на сегодняшний день масштабы промышленной переработки твердых отходов ТЭЦ в РФ невелики [1, 2].

Исследования последних лет [1-4] показали, что техническая сера может успешно использоваться в качестве минерального вяжущего для получения химически стойкого и сравнительно недорогого строительного материала. Известно, что сера, имея ряд положительных технологических качеств: химическую инертность, гидрофобность, относительно низкую температуру плавления 113-130 °С, низкую вязкость расплава, а после кристаллизации - достаточную прочность, может рассматриваться как перспективный строительный материал [1-3]. В процессе взаимодействия с различными видами заполнителей серный расплав проникает в поры материала заполнителя, кристаллизуясь при последующем охлаждении. Следовательно, использование технической серы, в частности, для производства серных бетонов, не вызывает сомнения. Роль жидкой фазы в серных бетонах выполняет расплав серы, который и определяет основные реологические показатели серобетонной смеси. Высокая химическая и морозостойкость, низкие водопоглощение и теплопроводность, повышенная прочность и возможность повторного использования, способствуют расширению области применения серных бетонов в строительной отрасли [5-10]. Немаловажным преимуществом серных бетонов также является то, что при их изготовлении не используется цемент и вода для их затворения, а в качестве заполнителей используются отходы промышленного производства и, в частности, ЗШО. В этой связи целью работы является получение и изучение свойств композиций серных бетонов, в том числе их биостойкость, на основе техногенных отходов нефтехимического и теплоэнергетического комплексов.

Объекты и методы исследований

Для изготовления композиций серных бетонов использовались следующие материалы:

- Техническая сера - отход производства Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода, согласно ГОСТ 127.1-93. По химическому составу отход представляет собой товарный продукт, содержащий 99,9 % серы.
- Строительный кварцевый песок согласно ГОСТ 8736-93.
- ЗШО Казанской ТЭЦ-2 согласно ГОСТ 25818-91.

Образцы композиций серных бетонов изготавливались по так называемой «горячей» технологии, согласно которой исходные компоненты (сера, кварцевый песок и ЗШО) в заданных соотношениях перед перемешиванием предварительно подогреваются до температуры 140 ± 5 °С. Заливка горячего расплава серобетонной смеси производится в металлические формы размером 2'2'2 мм. Застывание и кристаллизация образцов серных бетонов происходит при комнатной температуре.

Изготовлены и исследованы три варианта композиций серных бетонов двенадцати составов «сера-кварцевый песок-ЗШО» с разными процентными соотношениями компонентов. Содержание серы в образцах серных бетонов составляет 30, 40 и 50 % по массе. Так композиции № 1-4 содержат 30 % серы, композиции № 5-8 - 40 % серы, композиции 9-12 - 50 % серы. Содержание кварцевого песка и ЗШО в образцах композиций меняется в пределах от 0 до 70 %.

Плотность образцов композиций серных бетонов определяли согласно ГОСТ 12730.1-78. Водопоглощение образцов композиций серных бетонов определяли согласно ГОСТ 12730.3-78.

ИК-спектральное исследование проводилось при стандартных условиях регистрации на спектрофотометре Perkin Elmer FT-IR Spectrometer model Spectrum 65 в области $4000-650$ см⁻¹ с помощью приставки неполного внутреннего отражения (НПВО) Miracle ATR (кристалл ZnSe). Спектры серных бетонов получали плотно прижимая фрагмент образца к поверхности элемента нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с кристаллом ZnSe.

Испытание прочности на сжатие образцов композиций серных бетонов проводилось согласно ГОСТ 10180-90 на лабораторном испытательном гидравлическом прессе ПСУ-10.

Обсуждение результатов

С целью идентификации химического состава серных бетонов проведено ИК-спектральное исследование образца бетона (композиция № 6). Полученный ИК-спектр серного бетона приведен на рис. 1.

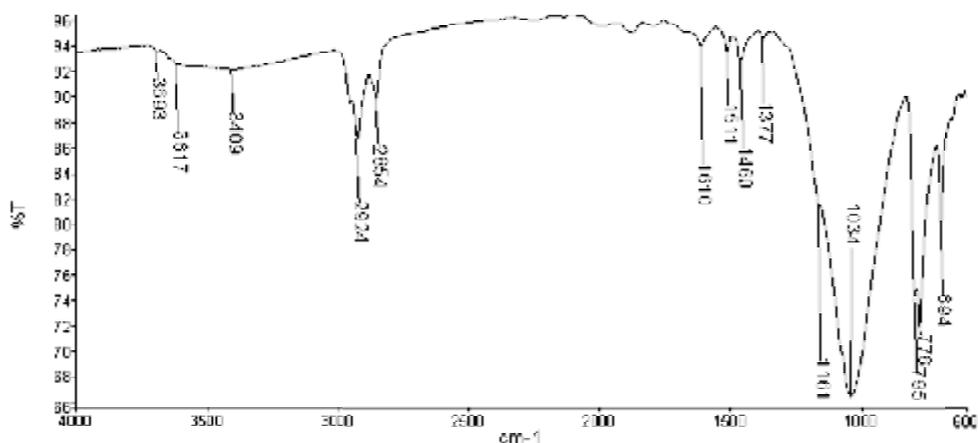


Рис. 1. ИК-спектр образца серного бетона (композиция № 6) (иллюстрация авторов)

ИК-спектрограмма серного бетона характеризуется наличием интенсивных полос поглощения в области $1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, обусловленных валентными колебаниями связей Si-O-Si [11]. Максимум поглощения на частоте 795 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи Si-O кварцевого песка. Валентным колебаниям смешанных комбинаций химических связей Al-O и Ca-O соответствуют полосы поглощения в ИК-спектре в области $600\text{--}800\text{ см}^{-1}$, что весьма характерно для, входящих в состав ЗШО, смесей моно-, диалюминатов кальция и оксида алюминия. Деформационным колебаниям связанных гидроксильных OH-групп на ИК-спектре соответствуют полосы поглощения 3693 см^{-1} , 3617 см^{-1} , 3409 см^{-1} , что свидетельствует о наличии органических примесей в технической сере (отход производства Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода). Этим же обстоятельством, по-видимому, объясняется наличие на спектрограмме бетона полос поглощения средней интенсивности с максимумами $2953\text{--}2855\text{ см}^{-1}$, соответствующих валентным колебаниям CH_2 - и CH_3 -групп. Полосы поглощения средней интенсивности с максимумами 1460 см^{-1} и 1377 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям этих же углеродных групп.

Как следует из данных [11], полосы поглощения в области $1210\text{--}1150\text{ см}^{-1}$ и $1060\text{--}1030\text{ см}^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям связи S-O окисленной серы. Однако, как показано выше, на ИК-спектре эти полосы поглощения полностью перекрываются полосами валентных колебаний связей Si-O-Si кварцевого песка.

Из анализа выше представленного ИК-спектра образца серного бетона (рис. 1), следует, что его химический состав включает серу с органическими примесями, кварцевый песок и ЗШО.

Далее, с целью изучения физико-химических характеристик серных бетонов, определена прочность на сжатие образцов композиций и построены зависимости изменения прочности на сжатие серных бетонов от содержания ЗШО в образцах (рис. 2).

Как следует из полученных данных (рис. 2), композиции серного бетона, содержащие как кварцевый песок, так и ЗШО, имеют более высокие прочностные характеристики по сравнению с композициями, содержащими только один из видов заполнителя. Как показывают результаты изменения прочности на сжатие серных бетонов, оптимальное содержание технической серы в композициях, необходимое для получения бетонов с высокими прочностными характеристиками, составляет 40 % (по массе), содержание в композициях серы в количестве 50 % и 30 % не позволяет получить серные бетоны с необходимыми для строительных материалов прочностными свойствами. Согласно литературным данным [3], содержание серы в бетонах обычно не превышает 30 %.

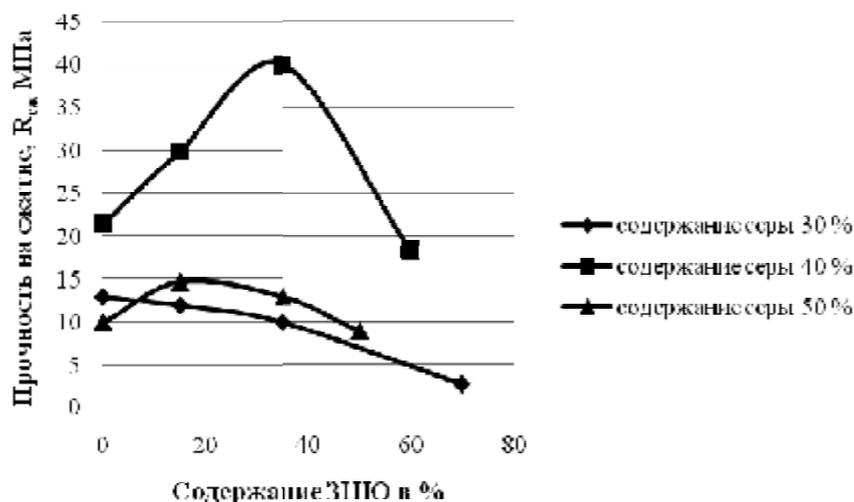


Рис. 2. Зависимость изменения прочности на сжатие серных бетонов (композиции № 1-4, 5-8, 9-12) от содержания ЗШО в образцах (иллюстрация авторов)

На основании проведенного анализа полученных экспериментальных данных установлено, что среди изученных композиций серных бетонов максимальными прочностными характеристиками обладают эмпирически подобранные композиция № 6 (прочность на сжатие, $R_{сж} = 30$ МПа) и композиция № 7 (прочность на сжатие, $R_{сж} = 40$ МПа). Следует отметить, что композиция № 6 серных бетонов содержит в своем составе 45 % песка и 15 % ЗШО (рис. 2). Наиболее оптимальная, с точки зрения прочностных характеристик, композиция № 7 содержит в своем составе 25 % песка и 35 % ЗШО (рис. 2). При дальнейшем увеличении в составе серобетонной смеси содержания, как кварцевого песка, так и ЗШО, прочность образцов бетонов снижается. Как известно, основным преимуществом использования в серных бетонах в качестве заполнителей кварцевого песка и ЗШО является то, что при добавлении ЗШО (обладающих большой дисперсностью) к песку, имеющему более крупные зерна, происходит распределение мелких зерен ЗШО между крупными зернами песка, что обеспечивает более полное уплотнение смеси. В результате введения в смесь расплава серы, он проникает в оставшиеся пустоты и серобетонная смесь приобретает более упорядоченную структуру.

Следует отметить, что прочностные характеристики на сжатие образцов композиций № 6 и 7 серных бетонов сопоставимы с аналогичными значениями для цементно-песчаных растворов, полученных на основе портландцементов М 400 и М 500 [12].

С увеличением содержания ЗШО в составе серобетонной смеси, прочность на сжатие бетонов начинает резко снижаться. Так композиция № 4, содержащая в своем составе 70 % ЗШО и 0 % песка, имеет минимальную прочность на сжатие в изученном ряду равную $R_{сж} = 3$ МПа, а композиция № 12, содержащая в своем составе 50 % ЗШО и 0 % песка, имеет сравнительно низкую прочность на сжатие $R_{сж} = 9$ МПа (рис. 2). Эти закономерности, по-видимому, можно объяснить увеличением пористости образцов из-за введения большого количества заполнителя с высокой степенью дисперсности, что обуславливает резкое понижение прочности серных бетонов.

Аналогичная ситуация со снижением прочности серных образцов наблюдается и при увеличении содержания кварцевого песка в составе серобетонной смеси. Так, композиция № 1, содержащая в своем составе 70 % песка и 0 % ЗШО, также имеет низкую прочность на сжатие $R_{сж} = 13$ МПа, а композиция № 9, содержащая в своем составе 50 % песка и 0 % ЗШО, имеет сравнительно низкую прочность на сжатие $R_{сж} = 10$ МПа (рис. 2). Эти зависимости, по-видимому, можно объяснить увеличением содержания крупнодисперсного заполнителя в серобетонной смеси, наличием пустот в структуре материала, и, как следствие, снижением плотности, а, следовательно, прочности образцов бетона.

Далее определена плотность образцов композиций серных бетонов. Сравнительные данные по результатам изменения плотности серных бетонов от содержания ЗШО приведены на рис. 3.

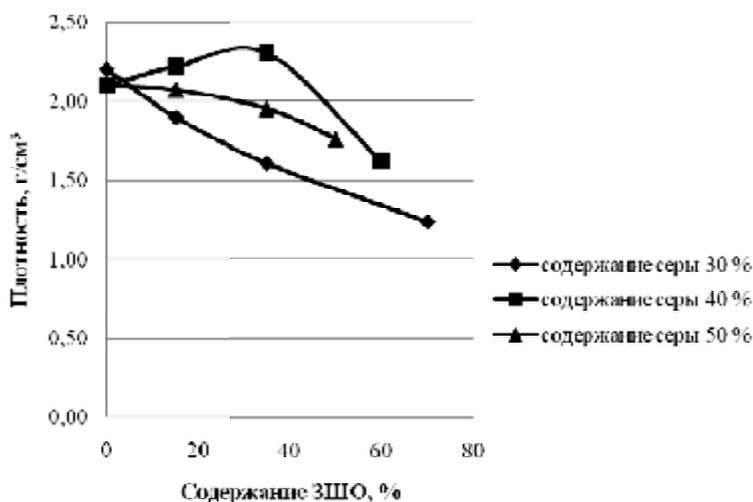


Рис. 3. Зависимость изменения плотности серных бетонов (композиции № 1-4, 5-8, 9-12) от содержания ЗШО в образцах (иллюстрация авторов)

На основании анализа полученных экспериментальных данных наблюдаются закономерности, аналогичные отмеченным выше. Так композиции № 6-7 серных бетонов с максимальными прочностными характеристиками на сжатие, имеют самую высокую плотность в изученном ряду - 2,22 и 2,31 г/см³, соответственно (рис. 3). Композиции бетонов с низкими прочностными характеристиками на сжатие (с максимальным содержанием ЗШО), имеют, соответственно, самые низкие значения плотности в изученном ряду:

- композиция № 4 (состав: 0 % песка и 70 % ЗШО) - 1,24 г/см³;
- композиция № 8 (состав: 0 % песка и 60 % ЗШО) - 1,62 г/см³;
- композиция № 12 (состав: 0 % песка и 50 % ЗШО) - 1,76 г/см³.

Следует обратить внимание на то, что, наблюдаемые на рис. 3, значения повышенной плотности композиций № 1, 5 и 9 (без содержания в составе ЗШО) связаны, по-видимому, с тем, что в этих бетонах пустоты между крупными зернами песка заполняются расплавом серы. Однако, ввиду образования при застывании расплава крупных кристаллов серы, имеющей высокую хрупкость, это не приводит к образованию прочных адгезионных связей между серой и кварцевым песком, что, в свою очередь, не повышает прочность образцов бетона.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что варьирование процентного содержания серы в композициях практически не влияет на плотность полученных бетонов.

Далее определено водопоглощение образцов композиций серных бетонов. Сравнительные данные по результатам изменения водопоглощения серных бетонов от содержания ЗШО приведены на рис. 4.

Полученные экспериментальные данные аналогичны вышеотмеченным зависимостям. Так композиции № 6-7 серных бетонов имеют максимальные прочностные характеристики на сжатие и самые низкие значения водопоглощения в изученном ряду - 0,7 и 0,63 %, соответственно (рис. 4).

Композиции с низкими прочностными характеристиками (с максимальными содержанием песка или ЗШО), соответственно, имеют и более высокие значения водопоглощения в изученном ряду:

- композиция № 1 (состав: 70 % песка и 0 % ЗШО) - 1,60 %;
- композиция № 4 (состав: 0 % песка и 70 % ЗШО) - 19,66 %;
- композиция № 8 (состав: 0 % песка и 60 % ЗШО) - 3,43 %;
- композиция № 9 (состав: 50 % песка и 0 % ЗШО) - 1,84 %.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод, что композиция № 4, имеющая минимальную прочность на сжатие, характеризуется наиболее высоким значением водопоглощения.

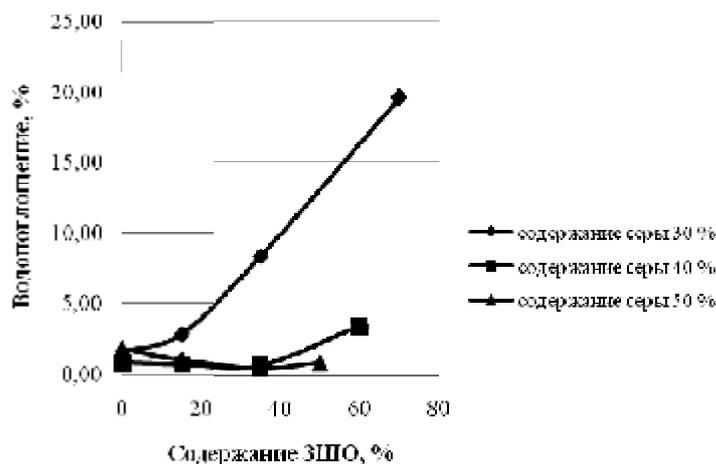


Рис. 4. Зависимость изменения водопоглощения серых бетонов (композиции № 1-4, 5-8, 9-12) от содержания ЗШО в образцах на шестые сутки проведения испытаний (иллюстрация авторов)

Таким образом, следует, что увеличение содержания ЗШО в композициях серых бетонов приводит к резкому увеличению их водопоглощения. Это обстоятельство, по-видимому, можно объяснить увеличением пористости образцов бетонов из-за введения большого количества заполнителя с высокой степенью дисперсности.

Далее, в продолжение ранее начатых исследований [12, 13], моделировался процесс биоповреждения композиций серых бетонов в слабоагрессивной среде лимонной кислоты с $\text{pH} = 3$ (рекомендуемое в литературе значение для карбоновых кислот [12]) в течение восьми суток при температуре 40°C . Изучение биостойкости образцов цементно-песчаных растворов (ЦПР) проводилось в лабораторной кинетической установке [14].

Полученные результаты кинетических исследований для композиций серых бетонов представлены на рис. 5.

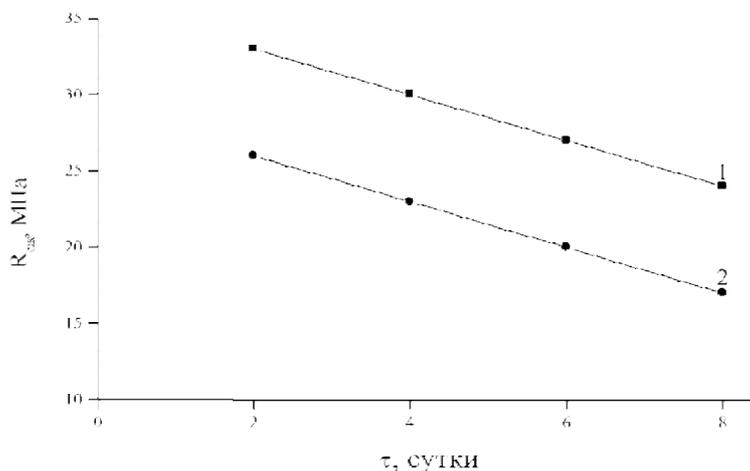


Рис. 5. Зависимость прочностных характеристик на сжатие образцов серых бетонов от времени экспозиции в модельной среде:
1 – композиция № 7; 2 – композиция № 6 (иллюстрация авторов)

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в процессе экспозиции образцов композиций серых бетонов в модельной среде наблюдается падение их прочностных характеристик на сжатие. Зависимости $R_{сж}=f(t)$ имеют линейный характер. Коэффициент корреляции r кинетических зависимостей имеет значение не менее 0,999, а стандартное отклонение S_d равно 0,01 и менее.

Результат взаимодействия образцов композиций серых бетонов с лимонной кислотой количественно представлен в таблице.

Таблица

**Результаты потери прочности на сжатие серных бетонов
после экспозиции в модельной среде при температуре 40 °С в течение 8 суток**

Серный бетон	Потеря прочности DR _{сж} , %
Композиция № 7	40,0
Композиция № 6	43,3

Как следует из экспериментальных данных, приведенных в таблице, биостойкость образцов композиции № 7 серных бетонов является максимальной. Следует отметить, что полученные результаты для серных бетонов сопоставимы с результатами для цементно-песчаных растворов (полученных на основе портландцементов М 400 и М 500), испытанных в тех же условиях [12].

Заключение

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Для получения серных бетонов с максимальными прочностными характеристиками, необходимо иметь в составе композиций компоненты: серу и два наполнителя с различной степенью дисперсности - кварцевый песок и золошлаковые отходы. Серные бетоны, в состав композиций которых входят только сера и золошлаковые отходы или сера и кварцевый песок, не обладают, необходимыми для бетонов, прочностными характеристиками.

2. Оптимальное содержание серы в композициях серных бетонов, необходимое для получения бетонов с максимальными прочностными характеристиками, должно составлять 40 % (по массе).

3. С увеличением содержания в составе серобетонной смеси золошлаковых отходов или кварцевого песка прочность образцов начинает резко снижаться. Среди изученных двенадцати композиций серных бетонов максимальными прочностными характеристиками обладают эмпирически подобранные композиция № 6 (прочность на сжатие, R_{сж} = 30 МПа) и композиция № 7 (прочность на сжатие, R_{сж} = 40 МПа).

4. Композиции № 6-7 серных бетонов с максимальными прочностными характеристиками на сжатие имеют наибольшую плотность образцов и наименьшее водопоглощение, что свидетельствует об их оптимальном составе и структуре.

5. Увеличение содержания золошлаковых отходов в составе серных бетонов приводит к резкому увеличению их водопоглощения. Это обстоятельство, по-видимому, можно объяснить увеличением пористости образцов из-за введения большого количества наполнителя с высокой степенью дисперсности.

6. Биостойкость серных бетонов в модельной среде лимонной кислоты сопоставима с аналогичными значениями для цементно-песчаных растворов, испытанных в тех же условиях.

7. Согласно Предварительному Национальному Стандарту 105-2016 [15], разработанные композиции № 1-3, 5-7, 9 и 10 можно отнести к серобетонным смесям средней плотности (от 1,8 до 2,8 г/см³) для тяжелого серобетона.

Список библиографических ссылок

1. 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.
2. Ахметова Р. Т., Медведева Г. А., Строганов В. Ф., Махиянова Л. Р., Ахметова А. Ю. Влияние активирующих добавок хлоридов металлов в пропиточных технологиях при утилизации отходов теплоэнергетики // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 739- 743.
3. Усов Б. А. Технология и применение серных бетонов // Системные технологии. 2015. № 17. С. 56–69.

4. Фомин А. Ю., Хозин В. Г. Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 80–82.
5. Королев Е. В., Прошин А. П., Ерофеев В. Т., Хрулев В. М., Горетый В. В. Строительные материалы на основе серы. Пенза-Саранск : МорГУ, 2003. 372 с.
6. Ciak N., Harasymiuk J. Sulphur concrete's technology and its application to the building industry // Technical Sciences. 2013. V. 16. № 4. P. 323–331.
7. Lee S., Hong K., Park J., Ko J. Influence of aggregate coated with modified sulfur on the properties of cement concrete // Materials. 2014. V. 7. № 6. P. 4739–4754.
8. 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. V. 10. Special Issue 1. P. 201–207.
9. Yusupova A., Akhmetova R., Treshchev A., Shafigullin L., Lakhno A., Bobrishev A. Sulfur composite technology from oil refinery waste // International journal of applied engineering research. 2016. V. 11. № 5. P. 3057–3061.
10. 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. V. 67. P. 20–29.
11. Беллами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул. М. : Изд-во Иностранной литературы, 1963. 592 с.
12. Строганов В. Ф., Сагадеев Е. В. Введение в биоповреждение строительных материалов. Казань : КГАСУ, 2014. 200 с.
13. Строганов В. Ф., Сагадеев Е. В. Биоповреждение строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 5–9.
14. Лабораторная установка для испытания образцов строительных материалов на биостойкость в модельных средах : пат. № 170410 Рос. Федерация. № 2016123279 ; заявл. 10.06.2016 ; опубл. 24.04.2017. Бюл. № 12. 1 с.
15. Предварительный Национальный Стандарт 105-2016. Смеси серобетонные и серобетон. Технические условия. М. : Стандартинформ. 2016. 16 с.

Stroganov Viktor Fedorovich

doctor of chemical sciences, professor

E-mail: svf08@mail.ru

Sagadeev Evgeniy Vladimirovich

doctor of chemical sciences, professor

E-mail: sagadeev@list.ru

Potapova Ludmila Ilinichna

candidate of chemical science, associate professor

E-mail: ludmilapo@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Muhametz'anov Marat Aydarovich

head of production and technical department

E-mail: maratmukhametzyanov@yandex.ru

LLC Company «Vorota»

The organization address: 420033, Russia, Kazan, Bogatyreva st., 7a

Obtaining and researching the properties of sulfur concrete based on technogenic wastes of the petrochemical and heat power complexes**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study was the manufacture of compositions and samples of sulfur concrete, the study of their physico-chemical characteristics and the assessment of biostability.

Results. The main results of the study consist in the manufacture of a number of sulfur concrete compositions, the determination of their physicochemical characteristics, and the conduct of kinetic studies to determine the biostability of sulfur concrete.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the fact that, as a result of the studies, sulfur concretes with high strength characteristics were obtained, their physicochemical properties (density, water absorption) were studied, biostability was determined, and conclusions were drawn about the effect of the chemical composition of the compositions on the properties of sulfur concretes and the possibility of their practical application.

Keywords: sulfur, quartz sand, ash and slag waste, strength, density, water absorption, biostability.

References

1. Medvedeva G. A., Akhmetova R. T., Yusupova A. A. Influence of activating metal chloride additives in impregnating technology of heat power wastes recycling // *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii. Tekhnicheskiye Nauki*. 2018. № 11. P. 43–47.
2. Akhmetova R. T., Medvedeva G. A., Stroganov V. F., Makhyanova L. R., Akhmetova A. Y. Influence of activating metal chloride additives in impregnating technology of heat power wastes recycling // *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014. № 11. P. 739–743.
3. Usov B. A. Technology and application of sulfur concrete // *Sistemnyye tekhnologii*. 2015. № 17. P. 56–69.
4. Fomin A. Yu., Khozin V. G. New sulfur-containing materials for road construction // *Stroitel'nye Materialy*. 2016. № 12. P. 80–82.
5. Korolev E. V., Proshin A. P., Erofeev V. T., Khrulev V. M., Gorety V. V. Building materials based on sulfur. Penza-Saransk : MorGU, 2003. 372 p.
6. Ciak N., Harasymiuk J. Sulphur concrete's technology and its application to the building industry // *Technical Sciences*. 2013. V. 16. № 4. P. 323–331.
7. Lee S., Hong K., Park J., Ko J. Influence of aggregate coated with modified sulfur on the properties of cement concrete // *Materials*. 2014. V. 7. № 6. P. 4739–4754.
8. 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. V. 10. Special Issue 1. P. 201–207.
9. Yusupova A., Akhmetova R., Treshchev A., Shafigullin L., Lakhno A., Bobrishev A. Sulfur composite technology from oil refinery waste // *International journal of applied engineering research*. 2016. V. 11. № 5. P. 3057–3061.
10. 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. V. 67. P. 20–29.
11. Bellamy L. J. New data on IR-spectra of complex molecules. M. : Izd-vo Inostrannoy literatury. 1963. 592 p.
12. Stroganov V. F., Sagadeev E. V. Introduction to the biodeterioration of construction materials: monograph. Kazan : KGASU, 2014. 200 p.
13. Stroganov V. F., Sagadeev E. V. Biodeterioration of construction materials // *Stroitel'nye materialy*. 2015. № 5. P. 5–9.
14. The laboratory setup for testing samples of construction materials on the biostability in modeling mediums : patent № 170410 of the Rus. Federation. № 2016123279 ; decl. 10.06.2016 ; publ : 24.04.2017. Bull. № 12. 1 p.
15. Provisional National Standard 105-2016. Mixtures of sulfur concrete and sulfur concrete. Technical conditions M. : Standartinform. 2016. 16 p.