

УДК 666.974:661.25

Н. М. Шалухо¹, Т. В. Булай², Е. В. Лукаш¹, А. В. Южик¹¹Белорусский государственный технологический университет²Гродненский государственный университет имени Я. Купалы**ПОЛУЧЕНИЕ БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРНОГО КЕКА**

Показана возможность применения серосодержащих отходов, образующихся на ряде нефтехимических и химических предприятий при производстве серной кислоты на стадии фильтрации расплавленной серы. Цель исследования – получение серного бетона на основе серного вяжущего с заменой части технической природной серы на серный кек и определение его физико-механических свойств. Это обеспечит снижение себестоимости серного бетона и решит проблему частичной утилизации отхода. Приведены экспериментальные результаты по получению образцов серного бетона, который представляет собой композиционный материал на основе серного вяжущего и наполнителя. Установлено, что замена природной серы на серный кек (до 35 мас. %) не вызывает ухудшения всего комплекса свойств (прочности на сжатие, плотности, водопоглощения, химической стойкости) по сравнению с контрольными образцами, не содержащими отход. Показатели водопоглощения и химической стойкости образцов серного бетона превосходят таковые для традиционных цементных бетонов. Экспериментальным путем установлен оптимальный состав серного бетона, мас. %: техническая сера – 50; серный кек – 25; песок – 25, обладающий следующими свойствами: прочность на сжатие – 51,3 МПа, водопоглощение – 0,28, химическая стойкость, выраженная через потери массы – 0,23–0,25%.

Ключевые слова: серный кек, техническая природная сера, серный бетон, отход, прочность, водопоглощение, наполнитель, песок, химическая стойкость, плотность.

Для цитирования: Шалухо Н. М., Булай Т. В., Лукаш Е. В., Южик А. В. Получение бетона с использованием серного кека // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 64–71.

N. M. Shalukho¹, T. V. Bulay², E. V. Lukash¹, A. V. Yuzhik¹¹Belarusian State Technological University²Grodno State University named after Ya. Kupala**PRODUCTION OF CONCRETE USING SULFUR CAKE**

The possibility of using sulfur-containing waste generated at a number of oil-chemical and chemical enterprises in the production of sulfuric acid at the stage of filtration of molten sulfur is shown. The purpose of the study is to obtain sulfur concrete based on a sulfur binder with the replacement of part of the technical natural sulfur with sulfur cake and to determine its physical and mechanical properties. This will ensure a reduction in the cost of sulfur concrete and solve the problem of partial waste disposal. Experimental results on obtaining samples of sulfur concrete, which is a composite material based on a sulfur binder and filler, are presented. It was found that the replacement of natural sulfur with sulfur cake (up to 35 wt. %) does not cause deterioration of the entire complex of properties (compressive strength, density, water absorption, chemical resistance) compared to control samples that do not contain waste. Indicators of water absorption and chemical resistance of sulfur concrete samples exceed those for traditional cement concretes. The optimal composition of sulfur concrete, wt. %, has been experimentally determined: technical sulfur – 50; sulfur cake – 25; sand – 25, which has the following properties: compressive strength – 51.3 MPa, water absorption – 0.28, chemical resistance expressed through mass loss – 0.23–0.25%.

Key words: sulfur cake, technical natural sulfur, sulfur concrete, waste, strength, water absorption, filler, sand, chemical resistance, density.

For citation: Shalukho N. M., Bulay T. V., Lukash E. V., Yuzhik A. V. Production of concrete using sulfur cake. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 2 (259), pp. 64–71 (In Russian).

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь производство серной кислоты ведется на трех химических предприятиях – ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «ГродноАзот»

и ОАО «Нафтан». Для перечисленных предприятий актуальной является проблема утилизации отходов, которые образуются при плавлении и фильтрации серы в плавильных установках,

приемных сборниках и отстойниках. Таким отходом является серный кек [1–4].

Серный кек – отход производства серной кислоты, относящийся к IV классу опасности, характеризуется способностью к самовозгоранию и запрещен к захоронению на полигонах промышленных отходов, что приводит к его накоплению и загрязнению окружающей среды.

Химический состав серного кека из отстойников, мас. %: S – 92,92; Cl – 4,01; Ca – 1,09; K – 0,56; Fe – 0,34; Ba – 0,34; V – 0,24; Cr – 0,15; Ti – 0,11; Ni – 0,07; Mn – 0,06; Sn – 0,01; остальные примеси – 0,1.

Для разработки технологии утилизации серных техногенных отходов важно соотношение серы и углерода, определяющее протекание окислительно-восстановительных процессов в системе. Содержание органических соединений в серном кеке невысокое, а минеральные компоненты – кальцит и сульфаты содержатся в незначительном количестве, что дает возможность использовать его для производства композиционных материалов строительного назначения.

Одним из перспективных направлений по утилизации серного кека является получение на его основе серного бетона [5].

Предприятия строительной отрасли для изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций по-прежнему применяют цементный бетон, который, помимо достоинств, обладает и рядом отрицательных свойств, значительно сужающих область его использования. Например, для него характерна низкая коррозионная стойкость, высокие показатели водопоглощения, низкая морозостойкость.

Исследования последних лет, как в нашей стране, так и за рубежом, показали, что для получения новых химически стойких и сравнительно недорогих строительных материалов с улучшенными свойствами возможно использование серы либо серосодержащих отходов.

Сера, входящая в состав отходов, выступает в качестве вяжущего компонента [6–7].

При различных сочетаниях серы и разнообразных заполнителей можно получить композиции нового строительного материала, по свойствам не уступающего, а часто и превосходящего традиционные [8–9].

Ранее в ряде работ, выполненных в Белорусском государственном технологическом университете и Гродненском государственном университете имени Янки Купалы [10–16], приведены результаты по получению оптимальных составов серного бетона на технической природной сере и различных заполнителях (песок, доломит, гранитные отсеvy). Данные составы характеризовались марочной прочностью на сжатие сразу после остывания образцов и удовле-

творяли требованиям по плотности, водопоглощению и химической стойкости [17–20].

Сера является одним из важнейших видов сырья для многих химических производств, а ее отличительные особенности, не свойственные большинству других веществ, обусловили постоянный и все возрастающий интерес к этому минеральному вяжущему, причем для него изыскиваются все новые области применения.

Техническую природную серу получают из самородных серных и полиметаллических сульфидных руд.

Отличие технологий производств бетонов, связанных с применением цементов, от технологии производства серного бетона на использовании серного вяжущего заключается в том, что при производстве серного бетона вместо цементов используется сера.

Классическая технология серных бетонов и изделий из них предполагает разогрев серного компонента до температуры плавления (120–150°C) с последующим совмещением его с наполнителем и формование изделий необходимой формы. В качестве наполнителя может использоваться песок, щебень и другое, в качестве серного вяжущего – сера, серосодержащие отходы и модификаторы [17].

Цель работы – получение серного бетона на основе серного вяжущего с заменой части технической природной серы на серный кек и определение его физико-механических свойств (плотности, прочности на сжатие, химической устойчивости к агрессивным средам, водопоглощения). Такая замена обеспечит снижение себестоимости серного бетона и решит проблему частичной утилизации отхода.

Объектом исследования являлись образцы бетона, полученные на технической природной сере и серном кеке.

Основная часть. В работе использовали серу [21], которая является продуктом размола комовой серы и имеет строго определенный зерновой состав, а также регламентированное содержание примесей железа, марганца и меди.

Для замены части молотой серы применяли серный кек, являющийся отходом производства олеума на ОАО «ГродноАзот». Заполнителем служил песок.

Серный бетон представляет собой композиционный материал, состоящий из заполнителей и серного вяжущего. Ранее было установлено, что оптимальный состав серного бетона содержит 25 мас. % наполнителя и 75 мас. % серного вяжущего [13, 19].

Изготовление образцов серного бетона включало следующие технологические операции: получение сырьевой смеси, состоящей из технической серы, серного кека и наполнителя в

виде кварцевого песка; плавление смеси при непрерывном перемешивании до температуры 140–150°C с целью достижения однородности массы; заливка смеси в предварительно подогретые металлические формы; вибрирование форм для удаления избыточного воздуха.

За счет быстрой кристаллизации расплавленной серы в течение 5 мин происходило схватывание и последующее затвердевание образцов. После распалубки форм образцы подвергались испытаниям физико-механических и химических свойств.

Исследование влияния фракционного состава наполнителя на прочность серного бетона проводилось на образцах, содержащих 50 мас. % природной серы, 25 мас. % серного кека и 25 мас. % песка [22].

Для проведения эксперимента применялись наиболее распространенные фракции, используемые в технологии цементного бетона: 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, а также 0,16 мм и менее.

Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние фракционного состава песка на прочность серного бетона

№ образца	Размер фракций песка, мм	Прочность на сжатие, МПа
1	1,25–2,50	27,9
2	0,63–1,25	28,7
3	0,315–0,630	33,6
4	0,160–0,315	39,6
5	0–0,16	43,1

Как видно из полученных данных, с уменьшением размера зерен заполнителя прочность образцов серного бетона увеличивалась. Фракция заполнителя в составе серного бетона 0,16 мм и менее обеспечивала максимальное среднее значение прочности образцов на сжатие – 43,1 МПа.

Исследуемые составы серобетонных смесей на основе природной серы, серного кека и песка представлены в табл. 2.

Удобоукладываемость оценивалась по технологичности заливаемой смеси в металлическую форму. Указанные смеси плавилась достаточно быстро, однако было замечено, что с увеличением содержания кека удобоукладываемость смесей значительно снижалась, а при 40–50 мас. % заливка смеси в формы становилась достаточно затруднительной.

Одним из недостатков серного бетона, как и любого цементного, является усадка при твердении. Однако характер усадочных деформаций в серном бетоне несколько другой. Усадка наблю-

дается не у затвердевшего серного бетона, а у заливаемой в форму серобетонной смеси. Было замечено, что с увеличением содержания серного кека в составе бетона усадочные деформации снижались, а при содержании кека 30–35 мас. % практически отсутствовали.

Таблица 2

Составы серного бетона

№ состава	Содержание компонентов, мас. %			Удобоукладываемость
	техническая сера	серный кек	песок	
1	65	10	25	+
2	60	15	25	+
3	55	20	25	+
4	50	25	25	+
5	45	30	25	+
6	40	35	25	+
7	35	40	25	–
8	25	50	25	–

Для дальнейшего определения качественных характеристик серного бетона изготавливали образцы-кубики размером 2×2×2 см, которые испытывали на сжатие сразу после их остывания. Результаты испытаний образцов серного бетона на сжатие представлены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость прочности на сжатие от состава серного бетона

№ состава	Содержание компонентов, мас. %			Прочность на сжатие, МПа
	техническая сера	серный кек	песок	
1	65	10	25	42,9
2	60	15	25	43,3
3	55	20	25	43,4
4	50	25	25	43,1
5	45	30	25	41,9
6	40	35	25	43,5

Как видно из полученных результатов, при увеличении содержания кека от 10 до 35 мас. % прочность образцов на сжатие изменялась незначительно (в пределах 4%). Это свидетельствует о том, что можно заменять до 35 мас. % природной серы на кек без потери прочности образцов.

Представляло интерес исследовать прочностные свойства образцов в более поздние сроки твердения. Результаты исследования представлены в табл. 4.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением времени твердения прочность серного бетона повышается.

Наибольшую прочность в возрасте 7 сут показал образец, содержащий 25 мас. % серного кека (51,3 МПа).

Таблица 4
Прочность образцов на сжатие в возрасте 7 сут

№ состава	Содержание компонентов, мас. %			Прочность на сжатие, МПа
	природная сера	серный кек	песок	
1	65	10	25	46,3
2	60	15	25	47,9
3	55	20	25	46,8
4	50	25	25	51,3
5	45	30	25	45,3
6	40	35	25	47,2

На основании полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением времени твердения прочность серного бетона повышается. Наибольшую прочность в возрасте 7 сут показал образец, содержащий 25 мас. % серного кека (51,3 МПа).

Присутствие серного кека в составе бетона от 10 до 35 мас. % практически не влияет на плотность образцов, которая находилась в пределах 2040–2080 кг/м³.

Более низкие значения плотности по сравнению с традиционным цементным бетоном [23] объясняются применением пылеватой фракции песка (<0,14 мм) в качестве наполнителя, которая при производстве цементного бетона не используется. При подборе фракционного состава крупного и мелкого заполнителя плотность, если необходимо, может быть значительно увеличена.

Водопоглощение серного бетона определялось в возрасте 7, 14 и 30 сут для составов, указанных в табл. 4 (рис. 1).

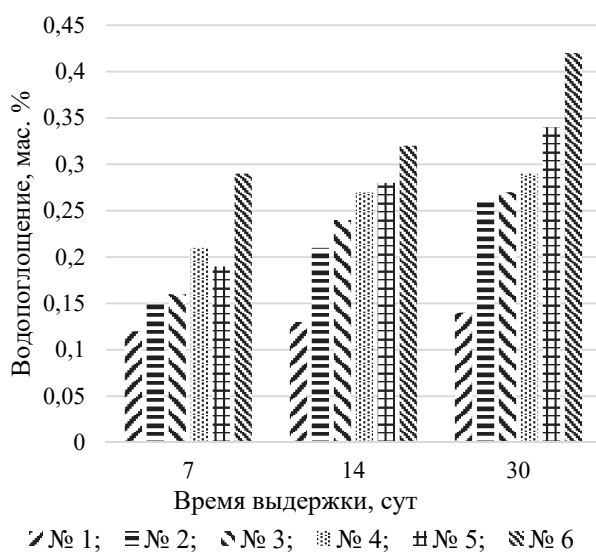


Рис. 1. Зависимость водопоглощения серного бетона от содержания в нем серного кека

Как видно из полученных данных, все образцы показали удовлетворительные результаты по водопоглощению (менее 1%) по сравнению с цементным бетоном, для которого этот показатель в возрасте 14 сут составил 1,82%.

Прирост массы образцов, содержащих от 10 до 35 мас. % серного кека, в возрасте 7 сут составил от 0,12 до 0,29%, в возрасте 14 сут – от 0,13 до 0,36%, в возрасте 30 сут – от 0,14 до 0,42%.

Поскольку серный бетон может применяться для изготовления полов на молочных заводах, а также футеровочных блоков, сливных лотков, коллекторных колец, химических емкостей, контейнеров для захоронения химических отходов, это обуславливает необходимость определения его химической стойкости в агрессивных средах.

Для определения химической стойкости серного бетона использовались молочная кислота концентрацией 60%, а также 30%-ная серная кислота. Образцы серного бетона выдерживались 30 сут в кислоте, а потери массы определялись в возрасте 7, 14 и 30 сут.

Объектом сравнения служил контрольный образец без кека, содержащий 75 мас. % природной серы и 25 мас. % песка.

Результаты значений химической стойкости по потерям массы представлены на рис. 2.

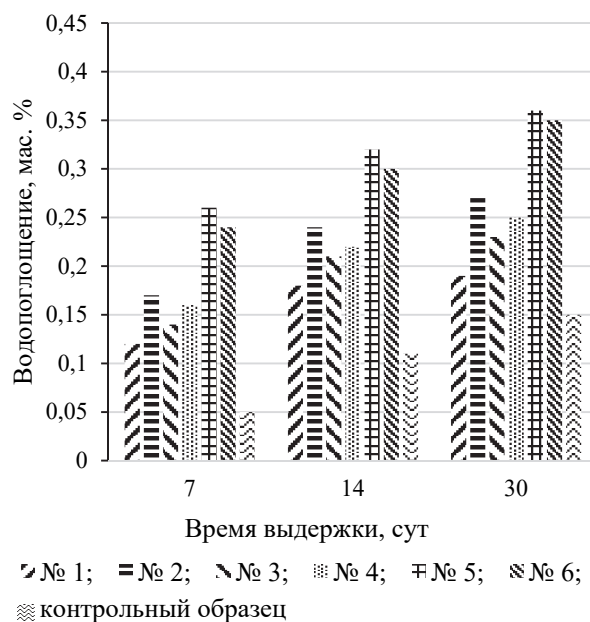


Рис. 2. Влияние состава и времени выдержки в 60%-ной молочной кислоте на химическую стойкость серного бетона

Как видно из рис. 2, все образцы серного бетона с содержанием в них кека от 10 до 35 мас. % показали удовлетворительные значения по химической стойкости, т. е. составляли менее 1% [24]. Потери массы образцов составили

от 0,05 до 0,26% в возрасте 7 сут, от 0,11 до 0,32% – 14 сут и от 0,15 до 0,36% – 30 сут. Наименьшими потерями массы характеризовался контрольный образец (без кека), наибольшими – образец, содержащий 30 мас. % кека.

Таким образом, присутствие в составе серного бетона кека в целом ухудшает химическую стойкость по сравнению с образцами на природной сере. По-видимому, это связано с негативным влиянием минеральных примесей, имеющихся в серном кеке. Следует отметить, что потери массы цементного бетона уже в возрасте 7 сут твердения составили 28,8%, т. е. не выдержали испытание в данной среде и полностью разрушились. Показатели химической стойкости образцов серного бетона в 30%-ной серной кислоте представлены на рис. 3.

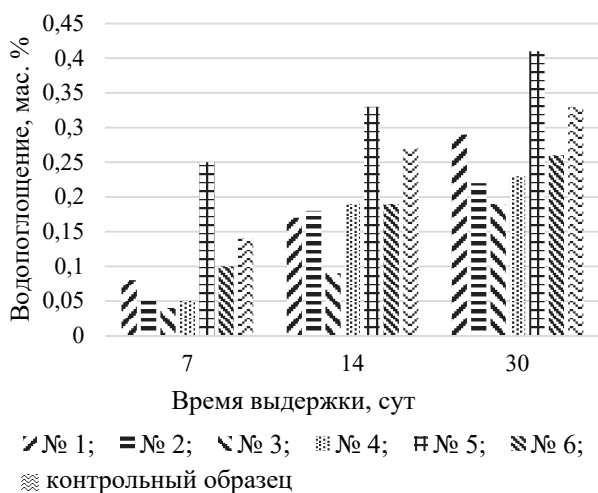


Рис. 3. Зависимость химической стойкости образцов от состава и времени выдержки

Из рис. 3 видно, что все образцы серного бетона с содержанием в них кека от 10 до 35 мас. % показали также удовлетворительные значения по химической стойкости по сравнению с контрольным образцом (без кека), в то время как цементный бетон данное испытание не выдержал, поскольку образцы полностью разрушились (потери массы цементного бетона в возрасте 7 сут составили 14,8%). Потери массы образцов серного бетона составили от 0,04 до 0,25% в возрас-

те 7 сут, от 0,09 до 0,33% – 14 сут, от 0,19 до 0,41% – 30 сут.

Наименьшими потерями массы отличался образец, содержащий 20 мас. %, наибольшими – 30 мас. % кека. Следует отметить, что все образцы серного бетона, выдержанные в 60%-ной молочной и 30%-ной серной кислотах, характеризовались потерями массы менее 1%, что свидетельствует об их химической стойкости.

Закключение. На основании полученных данных можно сделать вывод, что замена природной серы на серный кек (до 35 мас. %) не вызывает ухудшения всего комплекса свойств (прочности на сжатие, плотности, водопоглощения, химической стойкости) по сравнению с образцами, не содержащими в своем составе отход.

Согласно полученным экспериментальным данным оптимальным составом серного бетона можно считать состав № 4, мас. %: техническая сера – 50; серный кек – 25; песок – 25, обладающий следующими свойствами: прочность на сжатие – 51,3 МПа, водопоглощение – 0,28, химическая стойкость, выраженная через потери массы – 0,23–0,25%.

С уменьшением размера частиц фракций наполнителя происходит увеличение механической прочности и улучшение удобоукладываемости бетонной смеси. Причем высокая ранняя прочность присуща даже для образцов, приготовленных на пылеватых песках (менее 0,16 мм), что для традиционных бетонов на портландцементном вяжущем исключено.

Приготовление серобетонной смеси на основе отхода – серного кека и технической природной серы может быть представлено следующим образом: сушка и нагрев инертных наполнителей и заполнителей; приготовление расплава серного вяжущего; дозирование компонентов; перемешивание всех составляющих.

Таким образом, высокие показатели прочности и химической стойкости серного бетона, низкие значения водопоглощения по сравнению с традиционным цементным бетоном [23], а также возможность утилизации отхода – серного кека создают предпосылки для его успешного применения не только в строительстве, но и в других отраслях промышленности.

Список литературы

- Кузьменков М. И. Серный бетон из отходов // Строительство и архитектура. 1991. № 4. С. 16–18.
- Переработка серного шлама / А. С. Михалков [и др.] // 71-я Всерос. науч.-техн. конф.: сб. матер. конф.: в 3 ч. Ярославль, 18 апр. 2018 г. Ярославль, 2018. Ч. 1. С. 121–122.
- Перспективы получения и применения серобетона на основе кека серноокислотного производства / Т. В. Булай [и др.] // 82-я науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием): сб. тез. докл. Минск, 1–14 фев. 2018 г. Минск, 2018. С. 14.
- Кастрова В. А. Проблемы сбора и утилизации отходов в Республике Беларусь // Наука – 2019. Гродно, 2019. С. 14–17.

5. Попова И. А. Бетоны с повышенными физико-техническими свойствами на основе серосодержащих вторичных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. М., 2004. 18 с.
6. Волгушев А. Н., Шестеркина Н. Ф., Елфимов В. А. Применение серы и серосодержащих отходов в технологии производства строительных конструкций и изделий // Строительные материалы. 1990. № 10. С. 21–23.
7. Волгушев А. Н. Серное вяжущее и композиции на его основе // Бетон и железобетон. 1997. № 5. С. 46–48.
8. Орловский Ю. И. Технология изготовления и свойства серного бетона // Строительство и архитектура. 1986. № 12. С. 51–53.
9. Орловский Ю. И. Бетоны, модифицированные серой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Харьков, 1992. 45 с.
10. Булай Т. В., Шалухо Н. М., Кузьменков М. И. Модифицирование серы и получение на ее основе серного бетона // Международная науч.-техн. конф.: сб. матер. конф. Могилев, 26–27 апр. 2018 г. Могилев, 2018. С. 272–273.
11. Кузьменков М. И., Булай Т. В. Получение серного бетона и изучение его свойств // Проблемы современного бетона и железобетона. 2017. Вып. 9. С. 316–324.
12. Использование гранитных отсеков в производстве серного бетона / Н. М. Шалухо [и др.] // Сотрудничество – катализатор инновационного роста. 5-й Белорусско-Прибалтийский форум: сб. матер. конф. Минск, 9–10 окт. 2019. Минск, 2019. С. 34–35.
13. Шалухо Н. М., Бобровская Я. А. Разработка составов композиционных материалов на основе серы и различных наполнителей // 70-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 4 ч. Минск, 2019. Ч. 2. С. 373–375.
14. Булай Т. В., Кузьменков М. И., Шалухо Н. М. Композиционный материал на основе серы и серосодержащих отходов // Наука и инновационные технологии. 2020. № 16. С. 37–41.
15. Технология получения композиционных серосодержащих материалов / Н. М. Шалухо [и др.] // Химия. Экология. Урбанистика (с международным участием): Всерос. науч.-практ. конф. Пермь, 23–24 апр. 2020 г. Пермь, 2020. Т. 4. С. 219–222.
16. Бобровская Я. А., Шинкевич М. С., Шалухо Н. М. Разработка состава серного бетона и коррозионностойкого покрытия на основе серы // 71-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 2 ч. Минск, 20–25 апр. 2020 г. Минск, 2020. Ч. 2. С. 329–331.
17. Булай Т. В., Кузьменков Д. М., Шалухо Н. М. Исследование физико-механических свойств серного бетона // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: Междунар. науч. конф., посвященная 50-летию Полоцкого гос. ун-та: Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. Новополоцк, 2018. С. 46–48.
18. Исследование водопоглощения серного бетона / Т. В. Булай [и др.] // 83-я науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием): сб. тез. докл. Минск, 4–14 февр. 2019 г. Минск, 2019. С. 44–45.
19. Бобровская Я. А., Шалухо Н. М. Исследование прочностных свойств серосодержащих композиционных материалов // Молодежь и научно-технический прогресс: XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Губкин, 2020. С. 214–217.
20. Булай Т. В., Кузьменков М. И., Шалухо Н. М. Исследование химической стойкости серосодержащих композиционных материалов // Материалы с заданными свойствами на переходе к новому технологическому укладу: химические технологии: II науч.-техн. конф. Москва, 2020. С. 66–67.
21. Сера техническая. Технические условия: ГОСТ 127.1–93. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. 8 с.
22. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736–2014. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. 10 с.
23. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия: ГОСТ 26633–2015. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 13 с.
24. Бетоны химически стойкие. Методы испытаний: ГОСТ 25881–83. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1984. 7 с.

References

1. Kuz'menkov M. I. Sulfur concrete from waste. *Stroitel'stvo i arkhitektura* [Construction and architecture], 1991, no. 4, pp. 16–18 (In Russian).
2. Mikhalkov A. S., Kuz'menkov M. I., Bulay T. V., Shalukho N. M. Processing of sulfur sludge. *71-ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik materialov konferentsii* [71st All-Russian

Scientific and Technical Conference: collection of conference materials]. Yaroslavl', 2018, pp. 121–122 (In Russian).

3. Bulay T. V., Kuz'menkov M. I., Shalukho N. M., Kuz'menkov D. M., Sushkevich A. V. Prospects for the production and application of sulfur concrete based on a cake of sulfuric acid production. *82-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem): sbornik tezisov dokladov* [82nd Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation): collection of abstracts]. Minsk, 2018. P. 14 (In Russian).

4. Kastrova V. A. Problems of waste collection and disposal in the Republic of Belarus. *Nauka – 2019* [Science – 2019]. Grodno, 2019, pp. 14–17 (In Russian).

5. Popova I. A. *Betony s povyshennymi fiziko-tehnicheskimi svoystvami na osnove serosoderzhashchikh vtorichnykh otkhodov. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Concretes with enhanced physical and technical properties based on sulfur-containing secondary waste. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 2004. 18 p. (In Russian).

6. Volgushev A. N., Shesterkina N. F., Elfimov V. A. The use of sulfur and sulfur-containing waste in the production technology of building structures and products. *Stroitel'nyye materialy* [Building materials], 1990, no. 10, pp. 21–23 (In Russian).

7. Volgushev A. N. Sulfur binder and compositions based on it. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 1997, no. 5, pp. 46–48 (In Russian).

8. Orlovskiy Yu. I. Manufacturing technology and properties of sulfur concrete. *Stroitel'stvo i arkhitektura* [Construction and architecture], 1986, no. 12, pp. 51–53 (In Russian).

9. Orlovskiy Yu. I. *Betony, modifitsirovannyye seroy. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Concrete modified with sulfur. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Kharkiv, 1992. 45 p. (In Russian).

10. Bulay T. V., Shalukho N. M., Kuz'menkov M. I. Modification of sulfur and production of sulfur concrete on its basis. International Scientific and Technical conference. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: sbornik materialov konferentsii* [International Scientific and Technical conference: collection of conference materials]. Mogilev, 2018, pp. 272–273 (In Russian).

11. Kuz'menkov M. I., Bulay T. V. Production of sulfur concrete and study of its properties. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona* [Problems of modern concrete and reinforced concrete]. Minsk, 2017, vol. 9, pp. 316–324 (In Russian).

12. Shalukho N. M., Bulay T. V., Kuz'menkov M. I., Kuz'menkov D. M., Bobrovskaya Ya. A. The use of granite screenings in the production of sulfur concrete. *5-yy Belorussko-Pribaltiyskiy forum: sbornik materialov konferentsii* [5th Belarusian-Baltic Forum: collection of conference materials]. Minsk, 2019, pp. 34–35 (In Russian).

13. Shalukho N. M., Bobrovskaya Ya. A. Development of compositions of composite materials based on sulfur and various fillers. *70-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov: sbornik nauchnykh rabot* [70th Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and undergraduates: collection of scientific papers]. Minsk, 2019, pp. 373–375 (In Russian).

14. Bulay T. V., Kuz'menkov M. I., Shalukho N. M. Composite material based on sulfur and sulfur-containing waste. *Nauka i innovatsionnyye tekhnologii* [Science and innovative technologies], 2020, no. 16, pp. 37–41 (In Russian).

15. Shalukho N. M., Bulay T. V., Kuz'menkov D. M., Bobrovskaya Ya. A. Technology for the production of composite sulfur-containing materials. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika: Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Chemistry. Ecology. Urban Studies: All-Russian Scientific and Practical Conference]. Perm, 2020, vol. 4, pp. 219–222 (In Russian).

16. Bobrovskaya Ya. A., Shinkevich M. S., Shalukho N. M. Development of the composition of sulfur concrete and corrosion-resistant coating based on sulfur. *71-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov: sbornik nauchnykh rabot* [71th Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and undergraduates: collection of scientific papers]. Minsk, 2020, pp. 329–331 (In Russian).

17. Bulay T. V., Kuz'menkov D. M., Shalukho N. M. Investigation of physical and mechanical properties of sulfur concrete. *Arkhitekturno-stroitel'nyy kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashennaya 50-letiyu Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [International scientific conference sary ot Polotsk dedicated to the 50th anniversary of the University, Architecture and Construction complex: problems, prospects, innovations]. Novopolotsk, 2018, pp. 46–48 (In Russian).

18. Bulay T. V., Kuz'menkov M. I., Shalukho N. M., Kuz'menkov D. M. Investigation of water absorption of sulfur concrete. *83-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem): sbornik*

tezisov dokladov [83rd Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with International participation): collection of abstracts]. Minsk, 2019, pp. 44–45 (In Russian).

19. Bobrovskaya Ya. A., Shalukho N. M. Investigation of strength properties of sulfur-containing composite materials. *Molodezh' i nauchno-tekhnichestkiy progress: XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Scientific and Technological progress: XIII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Gubkin, 2020, vol. 4, pp. 214–217 (In Russian).

20. Bulay T. V., Kuz'menkov M. I., Shalukho N. M. Investigation of chemical resistance of sulfur-containing composite materials. *Materialy s zadannymi svoystvami na perekhode k novomu tekhnologicheskomu ukladu: khimicheskkiye tekhnologii: II nauchno-tekhnichestkaya konferentsiya* [Materials with specified properties in the transition to a new technological order: chemical technologies: II Scientific-Technical Conference]. Moscow, 2020, pp. 66–67 (In Russian).

21. GOST 127.1–93. Technical sulfur. Technical conditions. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 1997. 8 p. (In Russian).

22. GOST 8736–2014. Sand for construction work. Technical specifications. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2014. 10 p. (In Russian).

23. GOST 26633–2015. Concretes are heavy and fine-grained. Technical specifications. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2015. 13 p. (In Russian).

24. GOST 25881–83. Concretes are chemically resistant. Test methods. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 1984. 7 p. (In Russian).

Информация об авторах

Шалухо Наталия Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shalukho@belstu.by

Булай Татьяна Вячеславовна – старший преподаватель кафедры строительного производства. Гродненский государственный университет имени Я. Купалы (230023, г. Гродно, ул. Ожешко, 22, Республика Беларусь). E-mail: best20.04@mail.ru

Лукаш Елена Вацлавовна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ellukash@belstu.by

Южик Алина Викторовна – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alinayuzhik@gmail.com

Information about the authors

Shalukho Nataliya Mikhaylovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shalukho@belstu.by

Bulay Tat'yana Vyacheslavovna – Senior Lecturer, the Department of Construction Production. Grodno State University named after Ya. Kupala (22, Ozheshko str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: best20.04@mail.ru

Lukash Elena Vatslavovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ellukash@belstu.by

Yuzhik Alina Viktorovna – Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alinayuzhik@gmail.com

Поступила 18.05.2022