

## КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ СЕРНОГО КЕКА

Т. В. Булай<sup>1</sup>, М. И. Кузьменков<sup>2</sup>, Н. М. Шалухо<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Старший преподаватель кафедры архитектуры и строительства, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: TRoman@grsu.by

<sup>2</sup> Д. т. н., профессор кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: kuzmenkov.bgtu@mail.ru

<sup>3</sup> К. т. н., доцент кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: natashalukho@mail.ru

### Реферат

В материале статьи отражены результаты исследования композиционного материала на основе серного кека. Показана возможность эффективного применения серосодержащих отходов, образующихся на предприятиях химической отрасли Республики Беларусь. Целью исследования являлось получение серного бетона, изготовленного с использованием в качестве вяжущего компонента серного кека, образующегося при производстве серной кислоты на стадии фильтрации расплавленной серы на предприятии ОАО «Гродно Азот», в качестве заполнителей – традиционных материалов, используемых для приготовления цементных бетонов: песка, отходов камнеобработки, образующихся в процессе добычи и обработки гранитного щебня на РУПП «Гранит» (г. Микашевичи, Брестская обл.). При производстве серного бетона применение серного кека позволяет исключить применение портландцемента и воды, необходимых при приготовлении цементных строительных растворов.

В результате проведенных исследований установлено, что предел прочности при сжатии серного бетона на серном кеке в первые сутки испытаний показал значения, равные показателям предела прочности при сжатии мелкозернистых бетонов на портландцементном вяжущем в возрасте 28 суток. Показатели водопоглощения и химической стойкости образцов серного бетона превосходят значения для цементных бетонов. Экспериментальным путем установлены следующие оптимальные показатели серного бетона на серном кеке: предел прочности при сжатии – 51,1 МПа (серный кек – 70 мас. %, гранитные отсеvy – 30 мас. % с максимальной крупностью зерен 0,16 мм), водопоглощение – от 0,14 до 0,42 %, химическая стойкость (выражена через потери массы материала) – от 0,27 до 1,5 %.

Авторами статьи кратко изложены этапы приготовления серного бетона. Отмечены наиболее рациональные области применения композиционного материала на основе серосодержащих отходов.

**Ключевые слова:** серный кек, сера, серный бетон, отход, прочность, водопоглощение, химическая стойкость, наполнитель, гранитный отсев, кварцевый песок.

## COMPOSITIONAL MATERIAL BASED ON A SULFUR CAKE

T. V. Bulai, M. I. Kuzmenkov, N. M. Shalukho

### Abstract

The material of the article reflects the results of a study of compositional material based on a sulfur cake. The possibility of the effective use of sulfur containing waste formed at the enterprises of the chemical industry of the Republic of Belarus is shown. The aim of the study was to obtain sulfur concrete made using a sulfuric cake formed as an astringent component of sulfuric acid at the stage of filtering molten sulfur at the JSC "Grodno Azot", traditional materials used for the preparation of cement concrete: sand, waste of stone processing forming during pre and processing granite crushed stone on enterprise «Granite» (Mikashевичи, Brest region). In the production of sulfur concrete, the use of sulfuric cake allows us to exclude the use of Portland cement and water necessary in the preparation of cement construction solutions.

As a result of the studies it was found that the compressive strength of sulfur concrete on a sulfur cake in the first day of tests showed values equal to indicators of the compressive strength during the compression of fine grained concrete on Portland cement binder at the age of 28 days. Indicators of water absorption and chemical resistance of samples of sulfur concrete exceed the values for cement concrete. The following optimal indicators of sulfuric concrete on the sulfuric cake are established experimentally: compression strength – 51.1 MPa (sulfuric mash – 70 wt. %, granite shifts – 30 wt. % with a maximum size of grains of 0.16 mm), water absorption – from 0.14 to 0.42 %, chemical resistance (expressed through loss of mass of material) – from 0.27 to 1.5 %.

The authors of the article briefly set out the stages of preparation of sulfur concrete. The most rational areas of the application of compositional material based on sulfur containing waste were noted.

**Keywords:** sulfuric cake, sulfur, sulfur concrete, waste, strength, water absorption, chemical resistance, filler, granite scream, quartz sand.

### Введение

Проблема переработки и утилизации отходов на предприятиях строительной индустрии Республики Беларусь на сегодняшний день является одной из самых актуальных. В связи с бурным развитием строительной отрасли возрастает количество отходов, которые не только отрицательно влияют на окружающую среду, но и увеличивают затраты на их хранение, транспортирование и утилизацию.

В настоящее время в Республике Беларусь на предприятиях химической отрасли ОАО «Гродно Азот», ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Нафтан» образуется серосодержащий отход – серный кек, относящийся к IV классу опасности, запрещенный к захоронению и способный самовозгораться [1–3]. На сегодняшний

день данный отход не утилизируется и тем самым отрицательно влияет на состояние окружающей среды.

Возможность использования промышленных отходов, в частности серного кека, является одним из путей решения задач, возникающих при организации производства современных строительных материалов. Производство новых строительных материалов на основе отходов должно способствовать решению следующих проблем: улучшение экологической обстановки за счет их утилизации, удовлетворение потребности регионов в эффективных строительных материалах, снижение себестоимости материалов и изделий, снижение затрат в период эксплуатации за счет повышения качества и долговечности материалов.

Одним из перспективных направлений утилизации серного кека является получение композиционного материала – серного бетона на основе данного отхода, который служит вяжущим компонентом. При различных сочетаниях серного кека, заполнителей и наполнителей можно получить композиции нового строительного материала – серного бетона, по свойствам не уступающего, а часто и превосходящего традиционные материалы на цементном вяжущем [4].

В ряде работ, выполненных в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы и Белорусском государственном технологическом университете, приведены результаты испытаний свойств серного бетона, изготовленного с использованием природной серы, различных заполнителей и наполнителей. Природная сера являлась продуктом помола комовой серы с регламентированным содержанием примесей железа, марганца и меди и выступала в качестве вяжущего вещества [5]. Серный бетон по результатам прочностных испытаний в возрасте 1 суток обладал прочностью близкой к прочности мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток, а также удовлетворял требованиям по плотности, химической стойкости и водопоглощению [6–15].

#### Методы исследования

Целью данной публикации является получение серного бетона на основе серосодержащего отхода и определение его физико-механических свойств. Исследования материала проводились в лабораторных условиях. Объектом исследования являлись образцы серного бетона кубической формы размером 20 х 20 х 20 мм, изготовленные с использованием серного кека – отхода, образующегося при производстве серной кислоты на ОАО «Гродно Азот». Химический состав серного кека, мас. %: S – 87,2 %; K – 0,2 %; Ca – 1,1 %; Mn – 0,1 %; Fe – 9,5 %; Cl – 1,5 %; Ti – 0,1 %; V – 0,2 %, 0,1 % – остальные примеси. В качестве заполнителей использовали строительный песок, гранитные отсеvy различного фракционного состава, которые применяются для изготовления цементных бетонов [16, 17].

Технологический процесс изготовления опытных образцов серного бетона включал в себя проведение последовательных операций. Главной отличительной особенностью технологии производства серного бетона является приготовление исходной шихты, состоящей

из серного кека, заполнителей и наполнителей, тщательно перемешанных и нагретых до температуры 120–150 °С. Расплавление серы, входящей в состав серного кека, привело к образованию однородной и легкоподвижной серобетонной смеси, которой заполнялись предварительно подогретые металлические формы, смазанные тонким слоем смазки, и находящиеся на вибростоле. В результате вибрации происходило уплотнение серобетонной смеси. После окончания формовки смесь схватывалась в течение нескольких минут за счет кристаллизации расплавленной серы, входящей в состав серного кека. После остывания до комнатной температуры образцы извлекались из форм и подвергались испытаниям физико-механических и химических свойств [6, 7]. Таким образом, бетон набирает практически максимальную прочность сразу после окончания процесса формовки.

#### Результаты испытания и анализ

Образцы для проведения испытаний изготавливались из одной пробы серобетонной смеси и уплотнялись в одинаковых условиях. С целью подбора оптимального состава серного бетона на серном кеке соотношение между вяжущим и заполнителями варьировалось в широких пределах. Для проведения эксперимента по определению прочностных свойств серного бетона использовались измельченный серный кек, заполнитель полифракционного состава в виде песка и гранитных отсеv с наибольшей крупностью зерен 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм и менее для каждого исследуемого состава [18]. Необходимую фракцию песка получали путем просеивания через сито с диаметром отверстий, соответствующим максимальному размеру фракций заполнителя.

Перед испытанием образцы-кубики подвергались визуальному осмотру, устанавливалось наличие трещин, сколов, раковин. Нагружение образцов проводили непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до его разрушения. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимали за разрушающую нагрузку. Разрушение образцов проводили в лабораторных условиях с помощью испытательной машины Galdabini Quasar 50. Результаты испытаний приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Влияние фракционного состава песка на прочность серного бетона на серном кеке

| № состава | Размер фракций, мм | Соотношение компонентов, мас. % |       | Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ , МПа |
|-----------|--------------------|---------------------------------|-------|--------------------------------------------|
|           |                    | серный кек                      | песок |                                            |
| 1         | 5,0                | 70                              | 30    | 39,6                                       |
| 2         | 2,5                | 60                              | 40    | 46,8                                       |
| 3         | 1,25               | 50                              | 50    | 31,7                                       |
| 4         | 0,63               | 60                              | 40    | 41,4                                       |
| 5         | 0,315              | 60                              | 40    | 43,6                                       |
| 6         | 0,16 и менее       | 50                              | 50    | 49,0                                       |

Таблица 2 – Влияние фракционного состава гранитных отсеv на прочность серного бетона на серном кеке

| № состава | Размер фракций, мм | Соотношение компонентов, мас. % |                  | Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ , МПа |
|-----------|--------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
|           |                    | серный кек                      | гранитные отсеvy |                                            |
| 1         | 5,0                | 70                              | 30               | 23,5                                       |
| 2         | 2,5                | 70                              | 30               | 26,2                                       |
| 3         | 1,25               | 70                              | 30               | 30,7                                       |
| 4         | 0,63               | 70                              | 30               | 39,1                                       |
| 5         | 0,315              | 60                              | 40               | 45,8                                       |
| 6         | 0,16 и менее       | 70                              | 30               | 51,1                                       |

Проведенный эксперимент позволил установить оптимальные соотношения компонентов, входящих в состав серобетонной смеси с различной крупностью зерен заполнителя, приводящие к достижению максимального значения предела прочности при сжатии исследуемого материала. Анализ данных таблиц 1 и 2 показал, образцы серного бетона при использовании пылеватых фракций заполнителя – 0,16 мм и менее, содержащие 50 мас. % серного кека и 50 мас. % песка и 70 мас. % серного кека и 30 мас. % гранитных отсеv, показали максимальные

значения предела прочности при сжатии и составили 49,0 и 51,1 МПа соответственно.

Проведя анализ результатов эксперимента (таблицы 1, 2) установлено, что увеличение размера зерен заполнителей и использование гранитных отсеv ведет к снижению прочности серного бетона: для размера частиц 5 мм – на 68 %, 2,5 мм – на 44 %, 1,25 мм – на 3 %, 0,63 мм – на 5 %. С уменьшением размера зерен заполнителя прочность серного бетона возрастает: 0,315 мм – на 5 %, 0,16 мм – на 4 % (рисунок 1).

В целом более высокие значения предела прочности при сжатии образцов серного бетона на серном кеке, изготовленных с использованием песка, обусловлены тем, что последний обладает большей реакционной способностью по сравнению с гранитным отсеком и вступает в реакцию с серным кеком. Необходимо отметить, что дисперсный состав заполнителей играет важную роль в приготовлении серобетонной смеси и ее удобоукладываемости. Использование пылеватых фракций заполнителей с максимальной крупностью зерен 0,16 мм и менее обеспечило хорошую удобоукладываемость смеси, равномерное распределение зерен заполнителя в объеме серобетонной смеси, образование однородной

массы и, как следствие, более высокие значения предела прочности при сжатии: 49,0 МПа – предел прочности при сжатии для образцов, изготовленных с песком, 51,1 МПа – для образцов, изготовленных с гранитными отсеками. С уменьшением размера зерен заполнителя прирост прочности для образцов серного бетона с песком составил 24 %, с гранитными отсеками – 117 %.

Водопоглощение серного бетона на серном кеке определялось в возрасте 7, 14, 30, 120 и 360 суток для составов, которые показали наилучшие результаты предела прочности при сжатии (таблицы 1, 2) [19]. Результаты исследования представлены на рисунке 2.

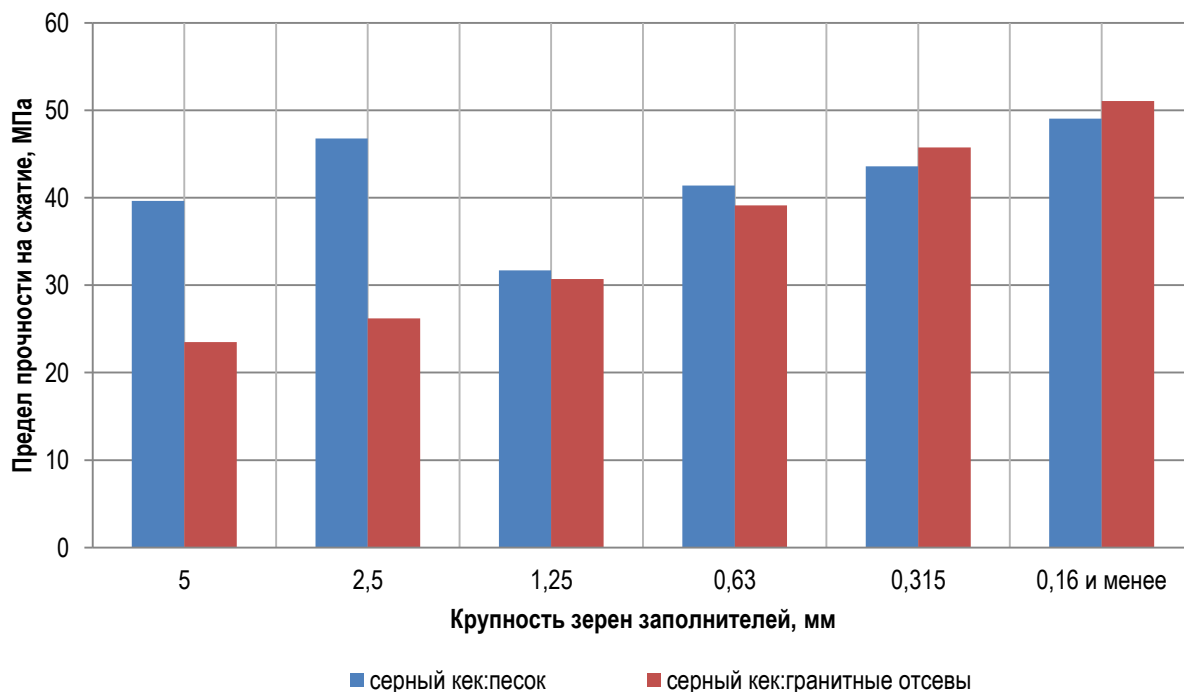


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности при сжатии серного бетона с кеком от вида и крупности заполнителя

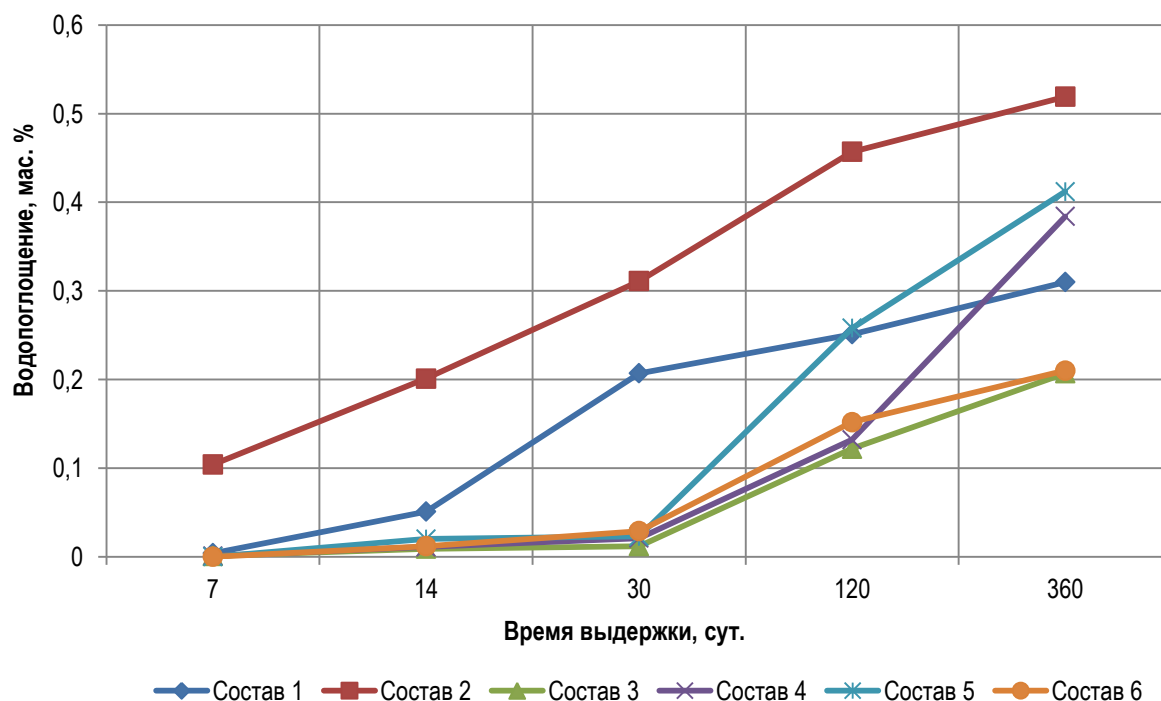


Рисунок 2 – Зависимость водопоглощения серного бетона от содержания серного кека и песка

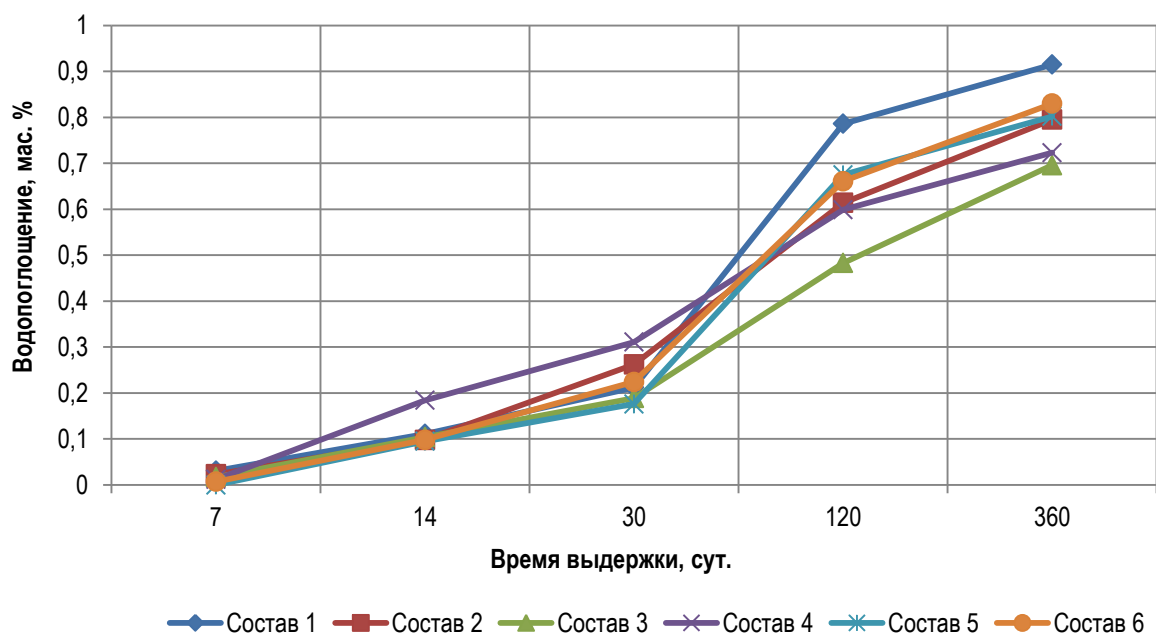


Рисунок 3 – Зависимость водопоглощения серного бетона от содержания серного кека и гранитных отсеков

Как видно из представленных данных на рисунках 2 и 3, все образцы серного бетона показали удовлетворительные значения по водопоглощению. Одновременно с серным бетоном в воду был погружен контрольный образец размером 40 x 40 x 160 мм, приготовленный из цементно-песчаного раствора в пропорции компонентов 1:3. Показатель водопоглощения для последнего образца в возрасте 14 сут. составил 1,82 %. Набор массы образцов, содержащих от 10 до 35 мас. % серного кека, в возрасте 7 сут. составляет от 0,12 до 0,29 %, 14 сут. – от 0,13 до 0,36 %, 30 сут. – от 0,14 до 0,42 %. Следует обратить внимание, что водопоглощение каждого образца в возрасте 360 дней не превышает 1 %.

Низкие значения водопоглощения серного бетона обусловлены тем, что сера при нагревании, переходя из твердого в вязко-текучее состояние, обеспечивает плотное расположение молекул относительно друг друга. При застывании полученной однородной смеси происходит кристаллизация расплавленной серы на поверхности заполнителя, молекулы серы заполняют все внутреннее простран-

ство вещества и обеспечивают практически полное отсутствие пористости в материале.

Серный бетон может использоваться в качестве материала, способного противостоять не только к проникновению воды, но и к агрессивному действию солей, кислот и щелочей.

Для определения химической стойкости серного бетона в качестве агрессивных сред использовали 1 %-ный едкий натр (NaOH); 30 %-ную серную кислоту ( $H_2SO_4$ ); 5 %-ную уксусную ( $CH_3COOH$ ) и 60 %-ную молочную кислоту ( $CH_3CHCOOH$ ). Для определения химической стойкости потери массы исследуемых образцов определялись в возрасте 7, 14 и 30 суток [20]. Представило интерес определить химическую стойкость образцов серного бетона на серном кеке в более длительные сроки. Так, время выдержки образцов в агрессивных средах составило 7, 14, 30, 120 и 360 суток. В качестве испытуемых образцов использовались образцы составов, которые показали наилучшие результаты предела прочности при сжатии (таблицы 1, 2). Результаты испытаний приведены на рисунках 4, 5.

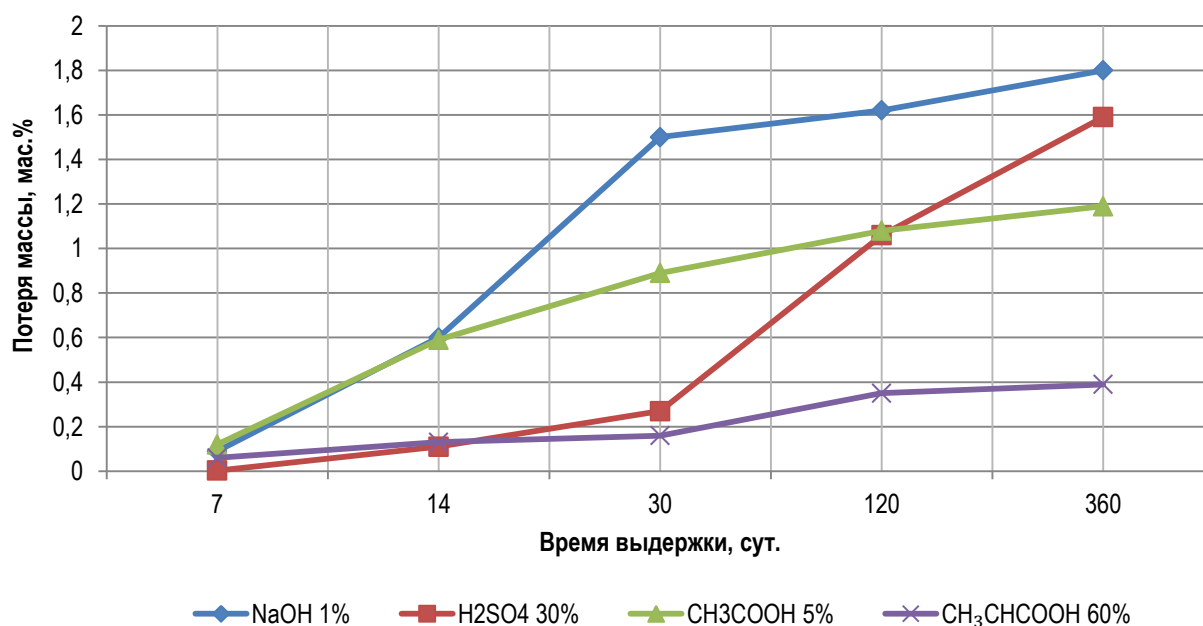
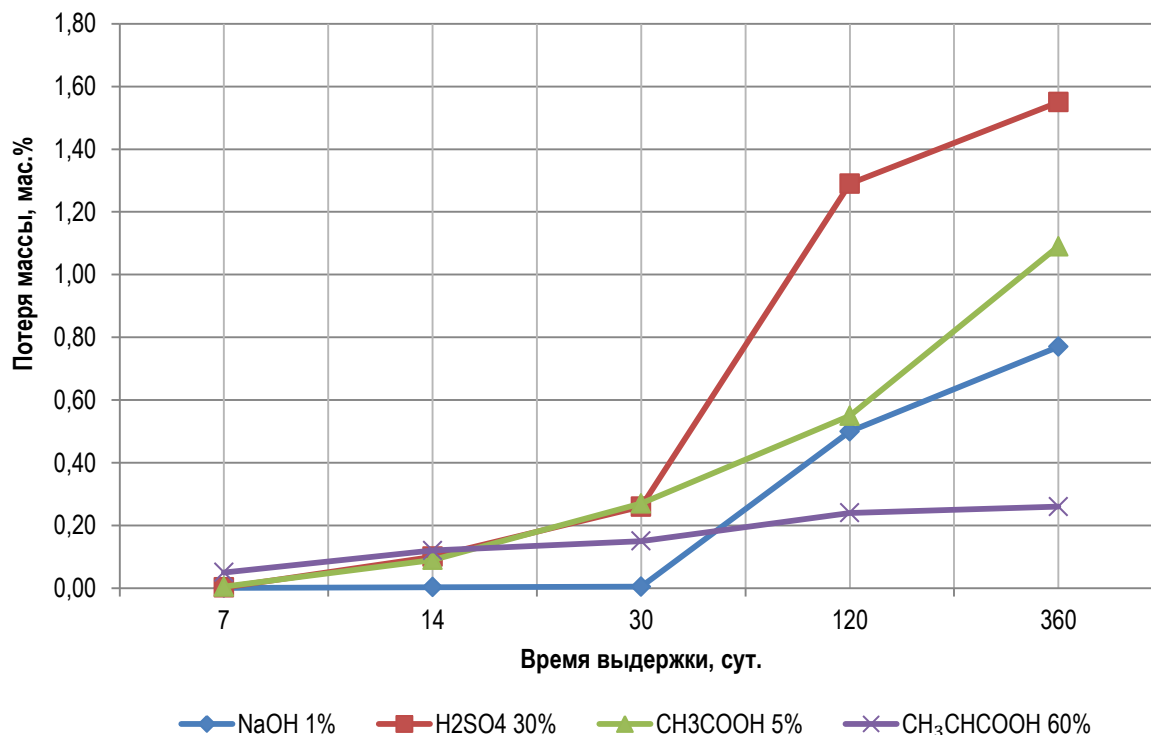


Рисунок 4 – Зависимость химической стойкости серного бетона на серном кеке с песком от вида агрессивной среды

Анализируя данные рисунка 4, можно сделать вывод, что образцы серного бетона на серном кеке с использованием песка в качестве наполнителя показали удовлетворительные значения по химической стойкости во всех исследуемых агрессивных средах. Потери массы

образцов в возрасте 7 сут. составили до 0,12 %, до 0,59 % – в возрасте 14 суток, до 1,5 % – в возрасте 30 суток. В возрасте 360 суток потери массы образцов составили от 0,39 % – при испытании в 60 %-ной  $\text{CH}_3\text{CHCOOH}$  и до 1,80 % – при испытании в 1 %-ном  $\text{NaOH}$ .



**Рисунок 5** – Зависимость химической стойкости серного бетона на серном кеке с гранитными отсевами от вида агрессивной среды

Как видно из рисунка 5, образцы серного бетона на серном кеке с использованием гранитных отсевов в качестве наполнителя также показали удовлетворительные значения по химической стойкости во всех агрессивных средах. Потери массы образцов в возрасте 7 сут. составили до 0,01 %, до 0,12 % – в возрасте 14 суток, до 0,27 % – в возрасте 30 суток. В возрасте 360 суток потери массы образцов составили от 0,26 % – при испытании в 60 %-ной  $\text{CH}_3\text{CHCOOH}$  и до 1,55 % – при испытании в 30 %-ной  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Результаты эксперимента показывают, что наименьшие потери массы характерны для образцов, содержащих в своем составе гранитные отсевы, что свидетельствует об их слабой реакционной способности при воздействии агрессивных веществ. Присутствие в составе серного бетона песка несколько ухудшает стойкость исследуемого материала к действию агрессивных сред вследствие его повышенной реакционной способности. Необходимо отметить, что все образцы серного бетона характеризовались потерями массы в возрасте 30 суток менее 1 %, что свидетельствует об их химической стойкости к действию агрессивных сред.

### Заключение

На основании полученных значений пределов прочности при сжатии образцов серного бетона на серном кеке можно сделать вывод, что фракционный состав, дисперсность и количество наполнителя оказывают значительное влияние на прочностные свойства серного бетона. Среднее значение показателя предела прочности при сжатии серного бетона с гранитными отсевами показали меньшие значения по сравнению с образцами серного бетона, изготовленными с использованием в качестве заполнителя песка, и составили соответственно 36,1 и 42 МПа (рисунок 1). Использование пылевидных фракций заполнителя приводит к достижению максимальных значений предела прочности при сжатии исследуемых образцов: 49 и 51,1 МПа для составов серный кек:песок и серный кек:гранитные отсевы соответственно.

Необходимо отметить, что серный бетон обладает уникальным свойством быстрого набора прочности и способен достигать высоких

прочностных показателей даже на мелких и пылеватых фракциях заполнителя через сутки после формирования, что для традиционных бетонов на портландцементном вяжущем невозможно.

Анализируя полученные данные по водопоглощению и химической стойкости серного бетона к действию агрессивных сред, можно сделать вывод, что серный бетон отвечает высоким требованиям по прочности, коррозионной стойкости и водопоглощению. С этой точки зрения можно выделить наиболее рациональные области применения исследуемого материала: технологическое оборудование на предприятиях химической отрасли (сгустители на калийных комбинатах), монолитный серный бетон, элементы для обустройства городских дорог (бортовой камень, тротуарная плитка, дорожные плиты, основания и покрытия дорог и др.), коррозионностойкие элементы промышленных и сельскохозяйственных зданий (плиты пола, кирпич, футеровочные блоки, сливные лотки, коллекторные кольца, емкости для агрессивных растворов), трубы (канализационные, дренажные), элементы нулевого цикла (фундаментные блоки, балки, сваи), силосные траншеи; стеновые материалы (кирпич, блоки, плитки, утеплитель), кровельные материалы (черепица, теплоизоляционные плиты, легкие навесы), монолитный серный бетон, декоративно-отделочные материалы (отделочные плиты, художественное литье, малые архитектурные формы), конструкции специального назначения (контейнеры для захоронения радиоактивных и химических отходов, экранирующие элементы), замоналичивание анкерных болтов линий электропередач, шпалы, электрические столбы, прочные, непроницаемые подземные резервуары и склады, площадки для выгула скота, составы для выполнения ремонтных и реставрационных работ [21, 22].

Серный бетон также может использоваться в качестве высокоэффективного покрытия, наносимого на внутреннюю поверхность канализационных труб, для защиты от агрессивного воздействия стоков, а также для осуществления быстрого ямочного ремонта дорожных покрытий.

Использование серного кека для изготовления серного бетона дает возможность утилизировать серосодержащий отход, образу-

щийся на предприятиях химической отрасли Республики Беларусь. На сегодняшний день серный кек складывается на полигонах предприятий, не утилизируется и оказывает отрицательное воздействие на состояние окружающей среды. Применение серного кека дает возможность не использовать портландцемент и воду, которые необходимы для приготовления цементных бетонов.

Согласно полученным экспериментальным данным оптимальными составами серного бетона можно считать следующие, мас. %: серный кек – 70, гранитные отсеивы – 30, обладающий следующими свойствами: предел прочности при сжатии – 51,1 МПа, водопоглощение – 0,22, химическая стойкость – до 0,27 % (выражена через потери массы в возрасте 30 суток); серный кек – 50, гранитные отсеивы – 50, обладающий следующими свойствами: предел прочности при сжатии – 49,0 МПа, водопоглощение – 0,03, химическая стойкость – до 1,5 %.

Таким образом, быстрые сроки твердения серного бетона, высокие показатели прочности и коррозионной стойкости, низкие значения водопоглощения дают возможность получить современный композиционный материал, который можно отнести к специальному виду бетонов и успешно применять в различных отраслях промышленности.

#### Список цитированных источников

- Кузьменков, М. И. Серный бетон из отходов / М. И. Кузьменков // Строительство и архитектура. – 1991. – № 4. – С. 16–18.
- Перспективы получения и применения серобетона на основе кека сернокислотного производства / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо [и др.] // Химическая технология и техника : тезисы докладов 82-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–14 февраля 2018 г. / Белорусский государственный технологический университет. – Минск, 2018. – С. 14.
- Кастрова, В. А. Проблемы сбора и утилизации отходов в Республике Беларусь / В. А. Кастрова // Наука-2019: сб. науч. ст. в 2 ч. – Гродно, 2019. – Ч. 2. – С. 14–17.
- Попова, И. А. Бетоны с повышенными физико-техническими свойствами на основе серосодержащих вторичных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. А. Попова. – М., 2004. – 18 с.
- Сера техническая. Технические условия: ГОСТ 127.1–93. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 8 с.
- Кузьменков, М. И. Получение серного бетона и изучение его свойств / М. И. Кузьменков, Т. В. Булай // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научных трудов. – Минск : Колорград, 2017. – Вып. 9. – С. 316–324.
- Булай, Т. В. Исследование физико-механических свойств серного бетона / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : Междунар. научн. конф., посвященная 50-летию Полоцкого гос. ун-та: сб. матер. конф. Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. – Новополоцк, 2018. – С. 218–220.
- Булай, Т. В. Модифицирование серы и получение на ее основе серного бетона / Т. В. Булай, Н. М. Шалухо, М. И. Кузьменков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. – Могилев, 2018. – С. 272–273.
- Исследование водопоглощения серного бетона / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо, Д. М. Кузьменков // Химическая технология и техника : материалы докладов 83-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 4–15 февраля 2019 г. – Минск, 2019. – С. 44–45.
- Бобровская, Я. А. Разработка составов композиционных материалов на основе серы и различных наполнителей / Я. А. Бобровская ; науч. рук. Н. М. Шалухо // 70-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ : в 4-х ч. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 373–375.
- Использование гранитных отсеивов в производстве серного бетона / Н. М. Шалухо, Т. В. Булай, М. И. Кузьменков [и др.] // Сотрудничество – катализатор инновационного роста: 5-й Белорусско-Прибалтийский форум : сб. матер., Минск, 9–10 октября 2019 г. – Минск, 2019. – С. 34–35.
- Булай, Т. В. Композиционный материал на основе серы и серосодержащих отходов / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Наука и инновационные технологии. – 2020. – № 16. – С. 37–41.
- Технология получения композиционных серосодержащих материалов / Н. М. Шалухо, Т. В. Булай, Д. М. Кузьменков, Я. А. Бобровская // Химия. Экология. Урбанистика : Всерос. науч.-практич. конф. (с международным участием): сб. матер. конф., Пермь, 23–24 апр. 2020 г. – Пермь, 2020. – Т. 4. – С. 219–222.
- Бобровская, Я. А. Исследование прочностных свойств серосодержащих композиционных материалов / Я. А. Бобровская, Н. М. Шалухо // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. : XIII междунар. научно-практич. конф. студ., асп. и молодых ученых : в 2 т. – Губкин, 2020. – Т. 1. – С. 214–217.
- Булай, Т. В. Исследование химической стойкости серосодержащих композиционных материалов / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Материалы с заданными свойствами на переходе к новому технологическому укладу: химическая технология : II науч.-техн. конф. : сб. матер. – М., 2020. – С. 66–67.
- Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8736-2014. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 10 с.
- Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267-93. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 11 с.
- Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. – 36 с.
- Бетоны. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3-2020. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2021. – 7 с.
- Бетоны химически стойкие. Методы испытаний: ГОСТ 58896-2020. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2020. – 11 с.
- Волгушев, А. Н. Применение серы в строительстве / А. Н. Волгушев // Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности Newchemistry.ru. – URL: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=4348](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4348) (дата обращения: 03.06.2025).
- Волгушев, А. Н. Производство и применение серных бетонов. Обзорная информация / А. Н. Волгушев, Н. Ф. Шестеркина // НИИЖБ. – М., 1991. – С. 3–51.

#### References

- Kuz'menkov, M. I. Sernyj beton iz othodov / M. I. Kuz'menkov // Stroitel'stvo i arhitektura. – 1991. – № 4. – S. 16–18.
- Perspektivy polucheniya i primeneniya serobetona na osnove keka sernokislotochnogo proizvodstva / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. Shaluho [i dr.] // Himicheskaya tekhnologiya i tekhnika : tezisy dokladov 82-j nauchno-tekhnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 1–14 fevralya 2018 g. / Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. – Minsk, 2018. – S. 14.
- Kastrova, V. A. Problemy sbora i utilizacii othodov v Respublike Belarus' / V. A. Kastrova // Nauka-2019: sb. nauch. st. v 2 ch. – Grodno, 2019. – CH. 2. – S. 14–17.
- Popova, I. A. Betony s povyshennymi fiziko-tekhnicheskimi svojstvami na osnove serosoderzhashchih vtorichnyh othodov : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / I. A. Popova. – M., 2004. – 18 s.

5. Sera tekhnicheskaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 127.1–93. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1997. – 8 s.
6. Kuz'menkov, M. I. Poluchenie sernogo betona i izuchenie ego svoystv / M. I. Kuz'menkov, T. V. Bulaj // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauchnykh trudov. – Minsk : Kolorgrad, 2017. – Vyp. 9. – S. 316–324.
7. Bulaj, T. V. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv sernogo betona / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Arhitekturno-stroitel'nyy kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii : Mezhdunar. nauchn. konf., posvyashchennaya 50-letiyu Polockogo gos. un-ta: sb. mater. konf. Novopolock, 5–6 apr. 2018 g. – Novopolock, 2018. – S. 218–220.
8. Bulaj, T. V. Modificirovanie sery i poluchenie na ee osnove sernogo betona / T. V. Bulaj, N. M. SHaluho, M. I. Kuz'menkov // Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Mogilev, 26–27 apr. 2018 g. – Mogilev, 2018. – S. 272–273.
9. Issledovanie vodopogloshcheniya sernogo betona / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho, D. M. Kuz'menkov // Himicheskaya tekhnologiya i tekhnika : materialy dokladov 83-j nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 4–15 fevralya 2019 g. – Minsk, 2019. – S. 44–45.
10. Bobrovskaya, YA. A. Razrabotka sostavov kompozitsionnykh materialov na osnove sery i razlichnykh napolnitelej / YA. A. Bobrovskaya ; nauch. ruk. N. M. SHaluho // 70-ya nauch.-tekhn. konf. uchashchihsya, studentov i magistrantov: sb. nauch. rabot : v 4-h ch. – Minsk, 2019. – CH. 2. – S. 373–375.
11. Ispol'zovanie granitnykh otsevo v proizvodstve sernogo betona / N. M. SHaluho, T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov [i dr.] // Sotrudnichestvo – katalizator innovatsionnogo rosta: 5-j Belorussko-Pribaltijskij forum : sb. mater., Minsk, 9–10 oktyabrya 2019 g. – Minsk, 2019. – S. 34–35.
12. Bulaj, T. V. Kompozitsionnyy material na osnove sery i serosoderzhashchikh othodov / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Nauka i innovatsionnye tekhnologii. – 2020. – № 16. – S. 37–41.
13. Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh serosoderzhashchikh materialov / N. M. SHaluho, T. V. Bulaj, D. M. Kuz'menkov, YA. A. Bobrovskaya // Himiya. Ekologiya. Urbanistika : Vseros. nauch.-praktich. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem): sb. mater. konf., Perm', 23–24 apr. 2020 g. – Perm', 2020. – T. 4. – S. 219–222.
14. Bobrovskaya, YA. A. Issledovanie prochnostnykh svoystv serosoderzhashchikh kompozitsionnykh materialov / YA. A. Bobrovskaya, N. M. SHaluho // Molodezh' i nauchno-tekhnicheskij progress : sb. dokl. : XIII mezhdunarod. nauchno-praktich. konf. stud., asp. i molodykh uchenykh : v 2 t. – Gubkin, 2020. – T. 1. – S. 214–217.
15. Bulaj, T. V. Issledovanie himicheskoy stojkosti seroso-derzhashchikh kompozitsionnykh materialov / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Materialy s zadannymi svoystvami na perekhode k novomu tekhnologicheskomu ukladu: himicheskie tekhnologii : II nauch.-tekhn. konf. : sb. mater. – M., 2020. – S. 66–67.
16. Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Metody ispytaniy: GOST 8736-2014. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2014. – 10 s.
17. SHCHeben' i gravij iz plotnykh gornykh porod dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya: GOST 8267-93. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2014. – 11 s.
18. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nykh obrazcam: GOST 10180-2012. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2018. – 36 s.
19. Betony. Metod opredeleniya vodopogloshcheniya: GOST 12730.3-2020. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2021. – 7 s.
20. Betony himicheskii stojkie. Metody ispytaniy: GOST 58896-2020. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2020. – 11 s.
21. Volgushev, A. N. Primenenie sery v stroitel'stve / A. N. Volgushev // Novye himicheskie tekhnologii. Analiticheskij portal himicheskoy promyshlennosti Newchemistry.ru. – URL: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=4348](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4348) (data obrashcheniya: 03.06.2025).
22. Volgushev, A. N. Proizvodstvo i primeneniye sernykh betonov. Obzornaya informatsiya / A. N. Volgushev, N. F. SHesterkina // NIIZHB. – M., 1991. – S. 3–51.

*Материал поступил 14.07.2025, одобрен 16.07.2025, принят к публикации 17.07.2025*