

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.31

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Использование пеностекла (гранулированного) в очистке городских поверхностных сточных вод

Олеся Александровна Самодолова, Дмитрий Владимирович Ульрих,
Татьяна Мопровна Лонзингер, Сергей Егорович Денисов

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При очистке природных объектов от тяжелых металлов определяющую роль играют сорбционные технологии, для развития которых необходимы новые виды сорбентов. Цель исследования — оценка сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных сточных вод (СВ) с урбанизированных территорий от тяжелых металлов (на примере Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb и Zn).

Материалы и методы. В качестве сорбента использовали гранулированное пеностекло. Сорбатом являлись поверхностные СВ урбанизированной территории г. Челябинска. Изучалось взаимодействие в системе «сорбент – сорбат» в лабораторных условиях методом ограниченного объема при статической сорбции, когда загрязнители находились в жидкой фазе и приводились в контакт с неподвижным сорбентом. Варьировали время контакта сорбента с сорбатом от 3 до 168 ч и температуру окружающей среды от 0 до 20 °С. Структуру и состав поверхности сорбентов исследовали на электронном растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV с приставкой для микроанализа с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Изменение состава сорбата при взаимодействии с сорбентами определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer). Водородный показатель устанавливали на микропроцессорном pH-метре pH-150MI.

Результаты. Изучены структура и состав поверхности гранулированного пеностекла. Выявлена эффективность сорбции гранулированного пеностекла тяжелых металлов из СВ урбанизированной территории.

Выводы. Полученные результаты показывают, что исследованное гранулированное пеностекло — эффективный сорбционный материал, позволяющий извлекать тяжелые металлы (кобальт, хром, медь, железо, никель, свинец, цинк) из поверхностного стока городов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные сточные воды, сорбент, пеностекло (гранулированное), сорбция, локальная очистка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самодолова О.А., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М., Денисов С.Е. Использование пеностекла (гранулированного) в очистке городских поверхностных сточных вод // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Ульрих, ulrikhdv@susu.ru.

The use of foam glass (granular) in urban surface water treatment

Olesya A. Samodolova, Dmitrii V. Ulrikh, Tatiana M. Lonzinger, Sergey E. Denisov

South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When purifying natural objects from heavy metals a decisive role is played by sorption technologies, for the development of which new kinds of sorbents are required. The aim of the study is to evaluate the sorption capacity of granulated foam glass in the treatment of surface wastewater (SW) from urbanized areas from heavy metals (on the example of Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn).

Materials and methods. Granulated foam glass was used as a sorbent. The sorbate was urban surface wastewater from the city of Chelyabinsk. The interaction in the sorbent-sorbate system was studied in laboratory conditions by the limited volume method of static sorption when the pollutants were in the liquid phase and brought into contact with a stationary sorbent. The contact time of the sorbent with the sorbate was varied from 3 to 168 hours and the ambient temperature from 0 to 20 °C. The structure and surface composition of the sorbents were studied using a JEOL JSM-6460LV scanning electron microscope with an attachment for micro X-ray spectral analysis. Changes in the sorbate composition during interaction with the sorbents were determined by atomic emission spectrometry on an OPTIMA 2100 DV spectrometer (Perkin Elmer). Hydrogen index was determined on a pH-meter microprocessor pH-150MI.

Results. The structure and surface composition of granulated cellular glass has been studied. The efficiency of sorption of granulated foam glass of heavy metals from urban surface wastewater has been revealed.

Conclusions. The results show that the investigated granulated foam glass is an effective sorption material and allows the extraction of heavy metals (cobalt, chromium, copper, iron, nickel, lead, zinc) from urban surface wastewater.

KEYWORDS: surface wastewater, sorbent, foam glass (granular), sorption, local treatment

FOR CITATION: Samodolova O.A., Ulrikh D.V., Lonzinger T.M., Denisov S.E. The use of foam glass (granular) in urban surface water treatment. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):9. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Corresponding author: Dmitrii V. Ulrikh, ulrikhdv@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая половина XX в. в развитых странах ознаменовалась сменой промышленной эпохи на эпоху обслуживания, концентрация потребления товаров и услуг указывает на возникновение «общества потребления». Основной целью «общества потребления» является повышение уровня жизни. Постоянное повышение уровня жизни возможно только при высоком темпе развития экономики, что в результате привело к неконтролируемому росту производства различных товаров и, как следствие, накоплению большого количества отходов. Наше общество ученые классифицируют как цивилизацию отходов. Согласно некоторым исследованиям, человечество может столкнуться с ресурсной катастрофой уже через несколько десятков лет^{1, 2}. Именно поэтому важное значение имеет рациональное использование существующих ресурсов и переход к экономике «замкнутого цикла» при применении природоподобных технологий. В природных системах нет отходов, отходы одних систем — это сырье для развития других. Одно из направлений развития природоподобных безотходных технологий — использование отходов производства в качестве сырьевых материалов. В период экологизации человеческого общества особенно актуально применение отходов промышленности, загрязняющих окружающую среду, для ее восстановления. При очистке природных объектов от тяжелых металлов определяющую роль играют сорбционные технологии, для развития которых необходимы новые виды сорбентов. Одним из таких сорбционных материалов может быть пеностекло.

Пеностекло — полностью неорганический прочный материал с хорошими теплоизоляционными характеристиками. Данный материал был получен в 30-х годах XX в. советским академиком И.И. Китайгородским. Изготавливается пеностекло из обычного стекла путем его размола до тонкого порошка, добавления газообразователя/порообра-

зователя (обычно порошка угля или мела) и термообработки полученной смеси при 750–850 °С. При повышенной температуре порошок стекла спекается, становится пластичным, а выделяющиеся из порообразователя газы расширяются и вспенивают материал, который после охлаждения сохраняет полученную форму. Пеностекло — экологически безопасный материал, не выделяющий вредных веществ даже при воздействии высоких температур. Устойчивость к температурному воздействию очень высока, пеностекло не горит и выдерживает нагрев до 600 °С. Пеностекло не подвержено разрушению на протяжении всего срока эксплуатации, оно не крошится, не насыщается влагой и не подвержено коррозии^{3, 4, 5}. Гранулы пеностекла — это мельчайшие частицы вспененного стекла, которые остаются в виде отходов (крошки) после производства пеностекляных плит и щебня. Также этот материал получают из отходов стекла, которое по различным причинам, в первую очередь техническим, нельзя использовать в стекольной промышленности для производства новых стеклянных изделий.

Для некоторых производств гранулированное пеностекло изготавливается специально в агрегатах, где расплав стеклобоя, поступающий в рабочую колонну, охлаждается встречным потоком воздуха. Гранулированное пеностекло, полученное по этой технологии, это неорганический, легкий, пористый материал в форме правильных шариков светло-серого цвета⁶. Другой вариант получения гранулированного пеностекла — многостадийный метод, при котором куски стекла предварительно перемалываются в мелкий порошок. Затем в смесительной установке к порошку добавляют воду, связующее вещество и порофор. Придание сферической формы частицам полученной смеси из стекла осуществляется в дисковом грануляторе. После этого гранулят вспенивается во вращающейся печи при температуре около 900 °С. Процесс вспучивания позволяет получить мелкопористый сферический гранулят

¹ Ильин А.Н. Потребление и его глобальные последствия // *Философия и общество*. 2013. № 2 (70). С. 83–99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potreblenie-i-ego-globalnye-posledstviya>

² Мировые запасы природных ресурсов: на сколько лет Земле хватит полезных ископаемых? URL: <https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnikh-resursov-na-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh>

³ Свойства и характеристики пеностекла: недостатки и достоинства данного материала. URL: <https://rcycle-net.turbopages.org/rcycle-net/s/steklo/produktsiya-iz-vtorichnogo/penosteklo>

⁴ Пеностекло. Традиционные и новейшие технологии. URL: <https://forumhouse-ru.turbopages.org/forumhouse-ru/s/journal/articles/4705-penosteklo-tradicionnye-i-novejshie-tehnologii>

⁵ Сравнительный анализ пеностекляного гранулята с аналогами. URL: https://penosytal-com.turbopages.org/penosytal-com/s/compare_gravel.html

⁶ Гранулированное пеностекло. URL: <https://pandia.ru/text/80/144/28899.php>

кремово-белого цвета, внутри частиц которого заключены мелкие пузырьки воздуха⁷.

Гранулы пеностекла применяются в качестве засыпного утеплителя и наполнителя для легких бетонов [1–6]; теплоизоляционной засыпки в строительстве [7–9], в том числе негорючей для скважин [10]; утепляющей присадки в различных смесях; их добавляют в кладочные растворы, смеси для стяжек и тампонажа, штукатурные и плиточные клеевые составы. Гранулированное пеностекло нередко служит в качестве отделочного материала для домов различного типа [11, 12], применяется при изготовлении плиточно-клеевой смеси [13]. Используют пеностекло и как добавку в строительный раствор или в виде заполнителя в промывочных жидкостях, которые требуются, например, для промывки буровых скважин, иммобилизирующего носителя в биотехнологии⁸; в качестве высокопрочных искусственных пористых заполнителей с плотностью от 400 до 970 кг/м³ и прочностью при сжатии 3,8–17,0 МПа [14]; для получения композиционных материалов [15]; изготовления каркасных композитов [16]; как подложку для экранирования испарения пролива легковоспламеняющихся жидкостей (абсорбция нефтепродуктов, попавших в воду и на землю) [17]; с целью получения тампонажного раствора для цементирования скважин [18]; в качестве теплоизоляционного материала для сохранения оснований в мерзлом состоянии и снижения рисков криогенных деформаций (в условиях Арктики) [19]. В настоящее время проведены исследования по оценке возможности использования пеностекла в виде фильтрующего материала, чтобы подтвердить применимость в качестве фильтрующего материала в дождевых садах [20].

Исследования и публикации по применению пеностекла в качестве сорбента сточных вод (СВ) для удаления тяжелых металлов в отечественной литературе отсутствуют, несмотря на его экологичность, водостойкость и другие полезные характеристики.

Цель данной работы — оценка сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных СВ с урбанизированных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является система гранулированное пеностекло (сорбент) и поверхностные СВ с урбанизированных территорий г. Челябинска (сорбат).

Поверхностные СВ с урбанизированных территорий г. Челябинска отбирали согласно общепринятым методикам.

Эффективность сорбционного процесса оценивали в статических условиях. Использовали метод ограниченного объема при соотношении твердая фаза:жидкость, равном 1:20. Температуру системы изменяли от 0 до 20 °. Время экспозиции составило 3–168 ч.

При проведении исследований применяли электронный растровый микроскоп JEOL JSM-6460LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа, эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer, США). В качестве фонового раствора использовали воду особой степени очистки, полученную на приборе Simplicity UV (Франция), pH-метр 150МИ.

Электронно-микроскопический анализ гранулированного пеностекла показал, что гранулы имеют округлую форму с шершавой поверхностью. Размер гранул меняется от 0,1 до 0,4 мм. Исследование микрорельефа поверхности проводилось при различной степени увеличения, верхний снимок — увеличение образца в 100 раз, средний — в 500 раз, нижний рисунок — увеличение в 2000 раз. При увеличении в 2000 раз (нижний снимок) отчетливо видны поры размером 1,39–3,23 мкм (рис. 1).

Микрофотография гранул приведена на рис. 1.

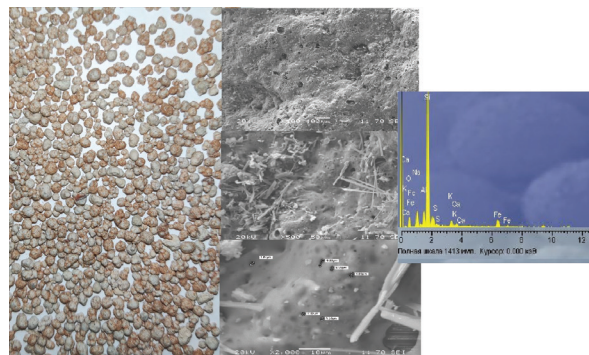


Рис. 1. Микрофотографии гранулированного пеностекла и данные микрорентгеноспектрального анализа

По данным микрорентгеноспектрального анализа исследуемые гранулы состоят из Na, S, Mg, O, Si, C, Ca, Al, K, Ti, Fe. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образца приведены в табл. 1.

Химический состав смешанной пробы сточных (ливневых) вод г. Челябинска представлен в табл. 2. Вода в пробе имеет значение водородного показателя 6,66, т.е. является нейтральной.

Данные табл. 2 показывают, что сточные ливневые воды загрязнены тяжелыми металлами.

⁷ Poraver. URL: <https://poraver.com/us/>

⁸ Патент RU № 2514070 C2, МПК C03B 19/08, E21B 43/267. Способ изготовления гранулята из пеностекла, а также гранулят из пеностекла и его применение / *Р. Чирш, М. Штиберт, А. Куне, Ю. Дриснер*; патентообл. ЛИАВЕР ГМБХ УНД КО. КГ; заявл. № 2012134279/03 от 06.01.2011; опубл. 27.04.2014.

Табл. 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца, %

Номер спектра	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe
1	46,73	23,71	6,99	14,02	3,25	2,45	0,79	0,73	0,52	0,52	0,29
2	50,58	34,68	4,72	3,04	3,19	2,12	0,66	0,6	0,41	0	0
3	45,18	38,33	6,2	0	4,61	3,31	1,02	0,95	0	0,4	0
4	42,91	37,33	5,95	0	4,27	6,39	1,92	0	0,52	0,71	0
5	50,82	25,21	7,19	9,79	2,85	1,8	0,66	0	0,81	0,51	0,36

Табл. 2. Химический состав сорбата

Элемент	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	pH
Содержание в городском поверхностном стоке, мг/л	0,004	0,002	0,028	2,624	0,01	0,02	0,286	6,66

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 3 приведены результаты исследования эффективности сорбционного процесса в системе «гранулированное пеностекло – сточная (ливневая) вода» в статических условиях.

Полученные результаты показывают, что сорбция кобальта, свинца и меди равна 100 % и не зависит от температурного режима и времени контакта сорбента с сорбатом. Полное извлечение хрома из ливневого стока происходит при контакте с сорбатом в течение 6 ч при температуре 0–10 °С, при температуре 20 °С время увеличивается до 168 ч.

Максимальное значение степени сорбции ионов железа 93 % достигается при температуре 0 °С через 168 ч контакта сточной воды с сорбентом. При повышении температуры воды эффективность удаления железа составляет 51–85 % в зависимости от времени экспозиции. Никель из стока полностью извлекается лишь при максимальном времени контакта 168 ч, температурный режим не оказывает влияния на его сорбцию.

Для ионов цинка оптимальными условиями 100 % сорбции является температура 0 °С и время контакта с сорбентом 3 ч. С увеличением температуры усиливается влияние реакции десорбции, поэтому эффективность процесса снижается.

На рис. 2 показана зависимость водородного показателя от температуры и времени контакта в системе «сорбент – сорбат».

Через 3 ч контакта в интервале температур 0–20 °С наблюдается повышение водородного показателя, связанное с адсорбцией катионов тяжелых металлов пеностеклом. Увеличение времени контакта сорбента с сорбатом приводит к росту водородного показателя из-за дальнейшего перехода загрязнителей в структуру сорбента.

Полученные данные показывают, что гранулированное пеностекло обеспечивает полное извлечение тяжелых металлов (кобальта, хрома, меди, никеля, свинца и цинка) из сточной ливневой воды. Концентрация катионов железа снижается на 93 %. В процессе очистки наблюдалось осветление СВ (рис. 3).

На рис. 4 приведена микрофотография поверхности гранулы пеностекла после процесса сорбции. Перед исследованием поверхность промывали дистиллированной водой для исключения попадания сорбата. Результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что после процесса сорбции на поверхности пеностекла увеличивается содержание железа, появляется цинк. Тяжелые металлы, которые в СВ имеют низкую концентрацию, на поверхности пеностекла методом микрорентгеноспектрального анализа обнаружить не удалось.

Проведенные исследования показали высокую эффективность гранулированного пеностекла при очистке городских сточных ливневых вод от катионов тяжелых металлов в статическом режиме.

Табл. 3. Анализ степени извлечения поллютантов из пробы при различной температуре и времени контакта, %

Показатель	Эффективность очистки при температуре и времени контакта, %								
	t = 0 °С			t = 10 °С			t = 20 °С		
	3 ч	6 ч	168 ч	3 ч	6 ч	168 ч	3 ч	6 ч	168 ч
Кобальт	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Хром	0	100	100	0	100	100	0	0	100
Медь	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Железо	80	85	93	51	73	83	68	75	83
Никель	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Свинец	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Цинк	100	100	100	50	83	83	50	67	100

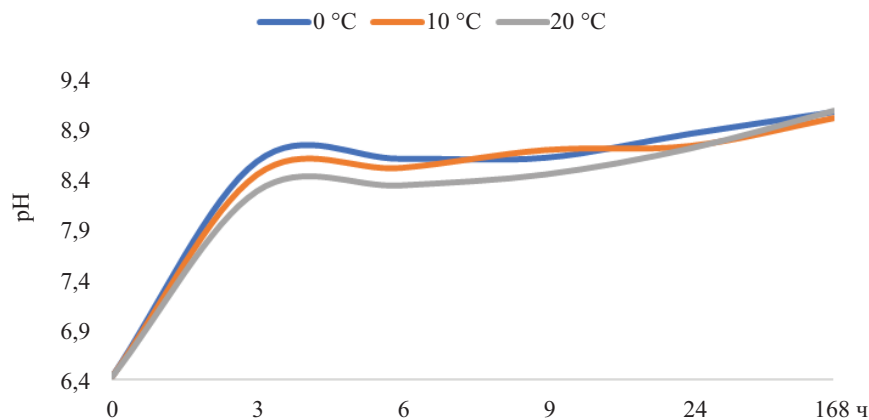


Рис. 2. Изменение pH при изменении температуры и времени контакта сорбента (гранулированного пеностекла) с сорбентом (сточная вода)

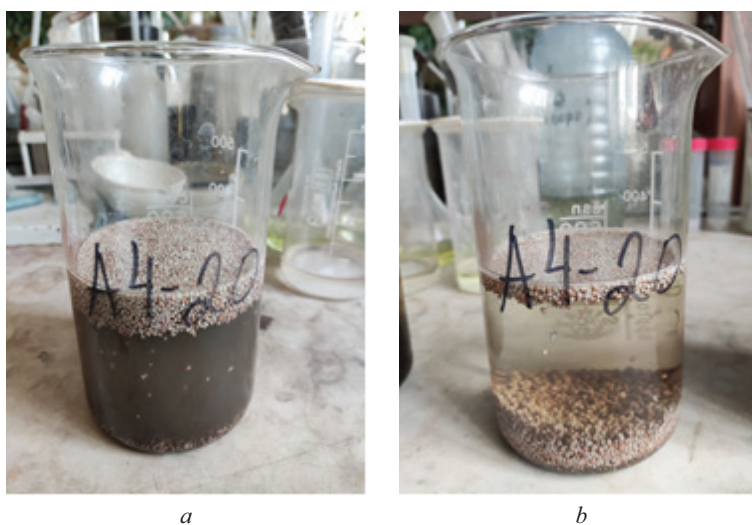


Рис. 3. Изучение сорбции загрязнителей из пробы: *a* — при контакте сорбента с сорбентом 0 ч; *b* — при контакте сорбента с сорбентом 24 ч

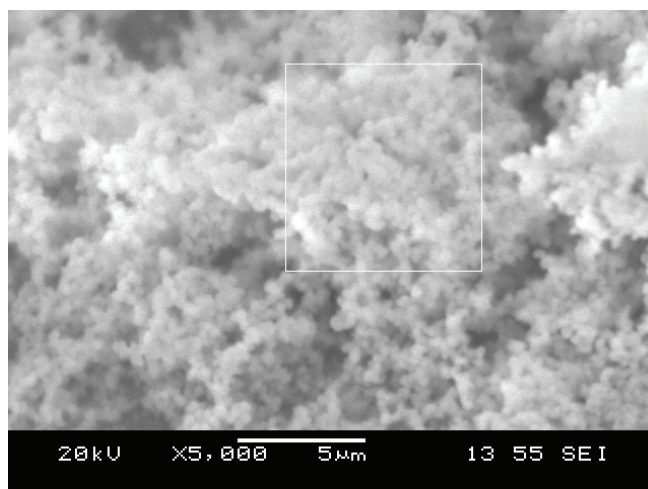


Рис. 4. Микрофотография поверхности гранулированного пеностекла и данные микроанализа

Табл. 4. Результаты микроанализа образца, %

Элемент	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe	Zn	Pb
Содержание, мас. %	40,2	19,44	4,09	7,91	4,11	2,76	1,31	0,91	0,65	0,74	1,34	0,16	0

В настоящий момент проводятся исследования сорбционной способности данного материала в динамических условиях, при различных температурах и скорости фильтрования с использованием сорбатов, содержащих тяжелые металлы в широком интервале концентраций. Предполагается использование пеностекла при создании композитного сорбента с целью снижения стоимости сорбционного материала, так как цена пеностекла сейчас достаточно высокая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследована эффективность сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных СВ с урбанизированных территорий.

Установлено, что в системе «гранулированное пеностекло – сточная вода» при статическом режиме эффективность сорбции кобальта, свинца и меди равна 100 % и не зависит от температурного режима и времени контакта сорбента с сорбатом.

Полное извлечение хрома из ливневого стока происходит при контакте с сорбатом в течение 6 ч при температуре 0–10 °С.

Максимальное значение степени сорбции ионов железа 93 % достигается при температуре 0 °С через 168 ч контакта СВ с сорбентом.

Никель из стока полностью извлекается лишь при максимальном времени контакта 168 ч, температурный режим не оказывает влияния на его сорбцию.

Для ионов цинка оптимальные условия 100%-ной сорбции — температура 0 °С и время контакта с сорбентом 3 ч.

Полученные экспериментальные данные показали, что гранулированное пеностекло служит перспективным сорбционным материалом для ионов тяжелых металлов. В ранее проведенных исследованиях по сорбционной способности пеностекла различной природы [21–24] рассматривались вопросы поглощения нефтепродуктов из воды. В работах экспериментально установлено, что механизм поглощения нефтепродуктов пеностеклом основан на действии капиллярных сил, т.е. происходит заполнение пор пеностекла органическими загрязнителями, которое нельзя отнести к процессам физической или химической адсорбции. Поэтому получение данных о сорбционном взаимодействии в системе «пеностекло – поверхностный сток с урбанизированных территорий» является новым ранее не известным результатом. При дальнейших исследованиях планируется определить технологические параметры нового материала (сорбционную емкость, периодичность замены).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pichór W., Kamiński A., Szoldra P., Frac M. Lightweight cement mortars with granulated foam glass and waste perlite addition // *Advances in Civil Engineering*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2019/1705490
2. Bessonov I., Bulgakov B., Zhukov A., Gradov V., Ivanova N., Kodzoev M.B. Lightweight concrete based on crushed foam glass aggregate // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1083. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012038
3. Бадретдинова В.Т., Серых Т.А. Роль разработки технологии гранулированного пеностекла в развитии отраслевых направлений «зеленой» экономики // *Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения* : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 786–789. EDN IRDPZO.
4. Dobeš P., Išvolt L., Mečár M. Experimental verification of modified sub-ballast layers, application of foam glass boards // *Civil and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 367–374. DOI: 10.2478/cee-2022-0034
5. Сопегин Г.В. Подбор состава и исследование свойств легкого бетона на основе гранулированного

пеностекла // *Master's Journal*. 2018. № 1. С. 104–111. EDN UZHPTO.

6. Заковская Л.В., Попов М.Ю. Легкие бетоны на основе гранулированного пеностекла // *Архитектура. Строительство. Образование*. 2015. № 1 (5). С. 26–31. EDN TOKXOJ.
7. Melnikov V.P., Melnikova A.A., Ivanov K.S. The use of granular foam-glass ceramic in the Arctic construction of low-rise buildings // *Arctic: Ecology and Economy*. 2022. Vol. 12. Issue 2. Pp. 271–280. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280
8. Libor I., Peter D., Holešová M., Deividas N. Assessment of the possibility of foam glass application in the sub-ballast layers // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2023. Vol. 29. Issue 3. Pp. 253–267. DOI: 10.3846/jcem.2023.18429
9. Chahour K., Aboutaleb D., Safi B., Mazari T., Zeghad M. Granulated foam glass based on mineral wastes used for building materials // *Building Acoustics*. 2017. Vol. 24. Issue 4. Pp. 281–294. DOI: 10.1177/1351010X17739434
10. Карпенко М.А., Тухомирова И.Н. Эффективный тепло- и звукоизоляционный материал на основе гранулированного пеностекла и минерального связующего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 3 (184). С. 43–45. EDN ZRTORH.

11. Krasnyuk A., Hromova O., Shcherbak A., Zibrov I. The mechanisms of formation of foam glass structure as an effective insulator for enclosing structures in architectural design of buildings and structures // Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice. 2022. Issue 21. Pp. 44–57. DOI: 10.15802/bttrp2022/258261
12. Модернизация технологии гранулированного пеностекла и перспективы использования материала // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. 2013. Т. 5. № 1. С. 64–76. EDN QA-BPZH.
13. Žurauskienė R., Navickienė L. Foam glass granule usage in tile glue mixtures that use a reduced portland cement amount // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 3. P. 1269. DOI: 10.3390/ma16031269
14. Сорокин Д.С., Береговой В.А. Искусственные пористые заполнители на основе гранулированного пеностекла // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 2 (23). С. 78–83. EDN UBGTRL.
15. Кетов Ю.А., Словилов С.В. Синтактические полимерные композиционные материалы высоконаполненные гранулированным пеностеклом // Computational Nanotechnology. 2019. Т. 6. № 3. С. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-39-46. EDN SZDRQZ.
16. Богатова С.Н., Богатов А.Д., Аришинова Ю.Д., Пупков М.Н. Водостойкость каркасных строительных композитов на основе гранулированного пеностекла // XLVII Огарёвские чтения : мат. науч. конф. 2019. С. 119–123. EDN DMHLEL.
17. Ширяев Е.В. Экранирование испарения пролива легковоспламеняющихся жидкостей гранулированной подложкой из пеностекла // Проблемы техносферной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. 2020. № 9. С. 73–79.
18. Катеев Р.И., Газизов М.Г., Латыпова Д.В. Облегченный тампонажный раствор с гранулированным пеностеклом // Инженер-нефтяник. 2014. № 4. С. 5–8. EDN TDOWXN.
19. Ivanov K. Use of granulated foam glass ceramics in the bases of transport facilities in the Arctic // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol. 59. Issue 1. Pp. 85–91. DOI: 10.1007/s11204-022-09787-7
20. Go H.W., Moon S.-Y., Kim H.S., Jang S.Y., Kang E.B., Joo J.C. Evaluation of the feasibility of foam glass as filter media in rain garden // Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2022. Vol. 44. Issue 12. Pp. 603–615. DOI: 10.4491/KSEE.2022.44.12.603
21. Коган В.Е., Згонник П.В., Ковина Д.О. Нефтесорбенты из пеностекла и кинетика нефтепоглощения // Теория и практика современной науки : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 36–41.
22. Коган В.Е., Згонник П.В., Черняев В.А. Нефтесорбенты из пенополиуретанов и кинетика нефтепоглощения // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 5. С. 26–30. EDN RAFOYT.
23. Коган В.Е., Згонник П.В., Ковина Д.О., Черняев В.А. Использование пеностекла и полимерных материалов в качестве эффективных нефтесорбентов // Стекло и керамика. 2013. № 12. С. 3–7. EDN RVPVPSX.
24. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chernyaev V.A. Foam glass and polymer materials: effective oil sorbents // Glass and Ceramics. 2014. Vol. 70. Issue 11–12. Pp. 425–428. DOI: 10.1007/s10717-014-9594-1

Поступила в редакцию 16 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 13 июня 2023 г.

Об авторах: **Олеся Александровна Самодолова** — аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1124060; samodolova@mail.ru;

Дмитрий Владимирович Ульрих — доктор технических наук, доцент, директор архитектурно-строительного института; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 562874, ORCID: 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Татьяна Мопровна Лонзингер — кандидат технических наук, научный сотрудник, доцент кафедры физико-химии материалов; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 730964; lonzingertm@susu.ru;

Сергей Егорович Денисов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; denisovse@susu.ru.

Вклад авторов:

Самодолова О.А. — идея, сбор материала, написание исходного текста.

Ульрих Д.В. — научное руководство, написание статьи, обобщение материала, доработка текста.

Лонзингер Т.М. — обобщение материала, доработка текста.

Денисов С.Е. — обобщение материала, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The second half of the twentieth century in developed countries was marked by the change from the industrial to the service age, the concentration of consumption of goods and services pointing to the emergence of a “consumer society”. The main aim of “consumer society” is to raise living standards. A permanent improvement in living standards is only possible at a high rate of economic development, which has resulted in an uncontrolled increase in the production of various goods and the consequent accumulation of large amounts of waste. Scientists classify our society as a waste civilization. According to some studies, humanity could face a resource catastrophe in just a few decades^{1, 2}. This is why the rational use of existing resources and the transition to a “closed cycle” economy using nature-like technologies is important. There is no waste in natural systems; the waste of one system is a raw material for the development of others. One of the directions of development of nature-like non-waste technologies is the use of production wastes as raw materials. At the time of ecologization of human society the use of industrial wastes, polluting the environment, for its restoration is especially urgent. When purifying natural objects from heavy metals, sorption technologies play a decisive role, for the development of which new kinds of sorbents are needed. One of such sorption materials can be foam glass.

Cellular glass is a completely inorganic, strong material with good thermal insulation properties. This material was obtained in the 1930s by the Soviet academician I.I. Kitaygorodskiy. Foam glass is produced from ordinary glass by grinding it to a fine powder, adding a gasifier/forming agent (usually coal or chalk powder) and treating the mixture thermally at 750–850 °C. At an elevated temperature, the glass powder sintered and becomes malleable and the gases released from the blowing agent expand and foam the material, which retains its shape after cooling. Cellular glass is an environmen-

tally-sound material, which does not emit any harmful substances even when exposed to high temperatures. Its thermal shock resistance is very high, it does not catch fire and withstands heat up to 600 °C. Cellular glass is indestructible during its whole service life, it does not crumble, does not become saturated with moisture and is not prone to corrosion^{3, 4, 5}. Cellular glass granules are the tiny particles of foamed glass which remain as waste (crumb) after production of cellular glass slabs and crushed stone. This material is also obtained from waste glass, which for various reasons, primarily technical, cannot be used in the glass industry for the production of new glass products.

For some production plants granulated foam glass is produced specifically in units where the molten glass fibre entering the working column is cooled by a counter flow of air. The granulated foam glass produced by this process is an inorganic, lightweight, porous material in the form of regular, light grey balls⁶. Another possibility for producing granulated cellular glass is the multistage method, in which pieces of glass are first ground to a fine powder. Then water, binder and phosphorus are added to the powder in a mixing plant. A disc granulator is used to give a spherical shape to the particles of the resulting glass mixture. The granulate is then foamed in a rotary kiln at about 900 °C. The foaming process produces a fine spherical granulate with a creamy white colour and fine air bubbles inside the particles⁷.

Cellular glass granules are used as bulk insulation and filler for lightweight concrete [1–6]; thermal insulating backfill in construction [7–9], including non-combustible for wells [10]; insulating additive in various mixtures; they are added to masonry mortars, screed and grouting mixes, plaster and tile adhesive compositions. The granulated cellular glass is often used as finishing material for different kinds of houses [11, 12], it is used in manufacturing of tile and adhesive mixture [13]. It is also used as an additive to mortar

¹ Ilyin A.N. Consumption and its global consequences, *Philosophy and Society*. 2013; 2(70):83-99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potreblenie-i-ego-globalnye-posledstviya>

² The world's reserves of natural resources: how many years' worth of minerals will the Earth have? URL: <https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnikh-resursov-na-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh>

³ Properties and characteristics of cellular glass: advantages and disadvantages of the material. URL: <https://rcycle-net.turbopages.org/rcycle.net/s/steklo/produktiya-iz-vtorichnogo/penosteklo>

⁴ Cellular glass. Traditional and emerging technologies. URL: <https://forumhouse-ru.turbopages.org/forumhouse.ru/s/journal/articles/4705-penosteklo-tradicionnye-i-novejshe-tehnologii>

⁵ Comparative analysis of expanded glass granulate with its counterparts. URL: https://penosytal-com.turbopages.org/penosytal.com/s/compare_gravel.html

⁶ Granulated foam glass. URL: <https://pandia.ru/text/80/144/28899.php>

⁷ Poraver. URL: <https://poraver.com/us/>

or as an aggregate in flushing liquids required e.g. for washing boreholes, immobilizing agent in biotechnology⁸; as high-strength artificial porous aggregates with density from 400 up to 970 kg/m³ and compressive strength 3.8–17.0 MPa [14]; for obtaining composite materials [15] production of frame composites [16]; as a substrate for shielding evaporation of flammable liquid spills (absorption of oil products released to water and ground) [17]; for production of plugging mortar for well cementation [18]; as a heat insulating material for keeping substrates frozen and reducing risks of cryogenic deformation (in Arctic conditions) [19]. Currently, studies have been carried out to assess the feasibility of using foam glass as a filtering material to confirm its applicability as a filtering material in rain gardens [20].

There are no studies and publications on the use of cellular glass as a wastewater sorbent (WWS) for heavy metal removal in the domestic literature, despite its environmental friendliness, water resistance and other useful characteristics.

The purpose of this work is to evaluate the sorption capacity of granulated cellular glass in the treatment of surface wastewater from urbanized areas.

MATERIALS AND METHODS

The object of the study is a system of granulated foam glass (sorbent) and surface wastewater from urbanized areas of Chelyabinsk (sorbate).

Surface wastewater from urbanized areas of Chelyabinsk was sampled according to generally accepted methods.

The efficiency of the sorption process was evaluated under static conditions. The limited volume method was used at a solid-liquid ratio of 1:20. The system temperature was varied from 0 to 20 °C. The exposure time was 3–168 h.

A JEOL JSM-6460LV electron scanning microscope with a micro X-ray spectroscopy attachment, an OPTIMA 2100 DV inductively coupled plasma emission spectrometer (Perkin Elmer, USA) were used for the studies. Specially purified water from Simplicity UV (France) and a 150MI pH-meter were used as a background solution.

Table 1. Results of micro X-ray spectral analysis of the sample, %

Spectrum number	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe
1	46.73	23.71	6.99	14.02	3.25	2.45	0.79	0.73	0.52	0.52	0.29
2	50.58	34.68	4.72	3.04	3.19	2.12	0.66	0.6	0.41	0	0
3	45.18	38.33	6.2	0	4.61	3.31	1.02	0.95	0	0.4	0
4	42.91	37.33	5.95	0	4.27	6.39	1.92	0	0.52	0.71	0
5	50.82	25.21	7.19	9.79	2.85	1.8	0.66	0	0.81	0.51	0.36

⁸ Patent RU No 2514070 C2, IPC C03B 19/08, E21B 43/267. *Method of making foam glass granulate and foam glass granulate and its application* / R. Chirsch, M. Stibert, A. Kuhne, J. Driesner; Patentobl. LIAVER GMBH & CO. KG; application. No. 2012134279/03 dated 06.01.2011; published 27.04.2014.

Electron microscopic analysis of the granulated cellular glass showed that the granules are round in shape and have a rough surface. The size of the granules varies from 0.1 to 0.4 mm. The surface micro-relief was investigated at different magnification levels, the upper picture being magnified 100 times, the middle picture 500 times and the lower picture 2,000 times. At a magnification of 2,000x (bottom image), pores with a size of 1.39–3.23 mm are clearly visible (Fig. 1).

A microphotograph of the pellets is shown in Fig. 1.

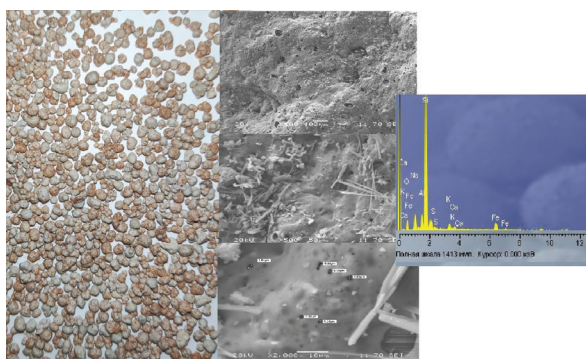


Fig. 1. Microphotographs of granulated cellular glass and micro X-ray spectral analysis data

According to the micro X-ray spectral analysis the investigated pellets consist of Na, S, Mg, O, Si, C, Ca, Al, K, Ti, Fe. The results of the micro X-ray spectral analysis of the sample surface are given in Table 1.

The chemical composition of the mixed wastewater (stormwater) sample of Chelyabinsk is presented in Table 2. The water in the sample has a hydrogen value of 6.66, i.e. it is neutral.

Table 2 shows that stormwater runoff is polluted with heavy metals.

RESEARCH RESULTS

Table 3 shows the results of the sorption process in the system “granulated foam glass – waste (storm) water” under static conditions.

The obtained results show that the sorption of cobalt, lead and copper is equal to 100 % and does

Table 2. Chemical composition of sorbate

The element	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	pH
Content in urban surface run-off, mg/l	0.004	0.002	0.028	2.624	0.01	0.02	0.286	6.66

Table 3. Analysis of pollutant recovery from the sample at different temperature and contact times, %

Indicator	Cleaning efficiency at temperature and contact time, %								
	<i>t</i> = 0 °C			<i>t</i> = 10 °C			<i>t</i> = 20 °C		
	3 h	6 h	168 h	3 h	6 h	168 h	3 h	6 h	168 h
Cobalt	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Chrome	0	100	100	0	100	100	0	0	100
Copper	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Iron	80	85	93	51	73	83	68	75	83
Nickel	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Lead	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Zinc	100	100	100	50	83	83	50	67	100

not depend on the temperature regime and contact time of the sorbent with the sorbate. Complete extraction of chromium from storm water runoff occurs at contact with sorbate for 6 hours at temperature 0–10 °C, at temperature 20 °C time increases to 168 h.

The maximum value of iron ions sorption degree 93 % is reached at temperature 0 °C after 168 hours of contact of wastewater with the sorbent. With increasing water temperature the efficiency of iron removal is 51–85 % depending on the exposure time. Nickel is completely removed from the effluent only at the maximum contact time of 168 hours, the temperature regime has no effect on its sorption.

For zinc ions optimum conditions of 100 % sorption are temperature 0 °C and contact time with sorbent 3 hours. With increasing temperature the effect of the desorption reaction increases, so the efficiency of the process decreases.

Fig. 2 shows the dependence of the hydrogen index on temperature and contact time in the sorbent-sorbate system.

After 3 hours of contact in the temperature range of 0–20 °C an increase in the hydrogen index is observed due to adsorption of heavy metal cations by the foam glass. Increasing the contact time of the sorbent with the sorbate leads to an increase in the hydrogen index due to further transfer of pollutants into the structure of the sorbent.

The data show that the granulated foam glass provides complete removal of heavy metals (cobalt, chromium, copper, nickel, lead and zinc) from storm water runoff. The concentration of iron cations is reduced by 93 %. During the treatment process, clarification of the wastewater was observed (Fig. 3).

Fig. 4 shows a micrograph of the surface of the cellular glass pellet after the sorption process. Before examination the surface was washed with distilled water to exclude sorbate ingress. The results of the micro X-ray spectral analysis are shown in Table 4.

Table 4 shows that after the sorption process iron content increases on the surface of the foam glass and zinc appears. Heavy metals which are of low concentration in wastewater, were not detected on the surface of the foam glass by means of micro-X-ray spectral analysis.

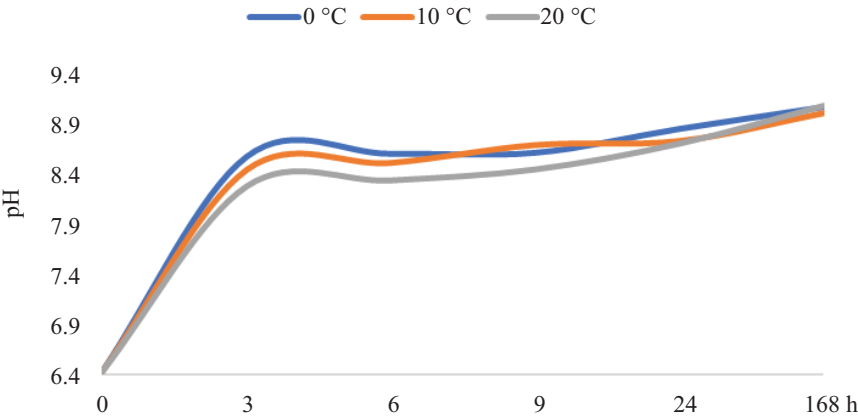


Fig. 2. Changes in pH if the temperature and time of contact of the sorbent (granulated foamed glass) with the sorbate (wastewater) change

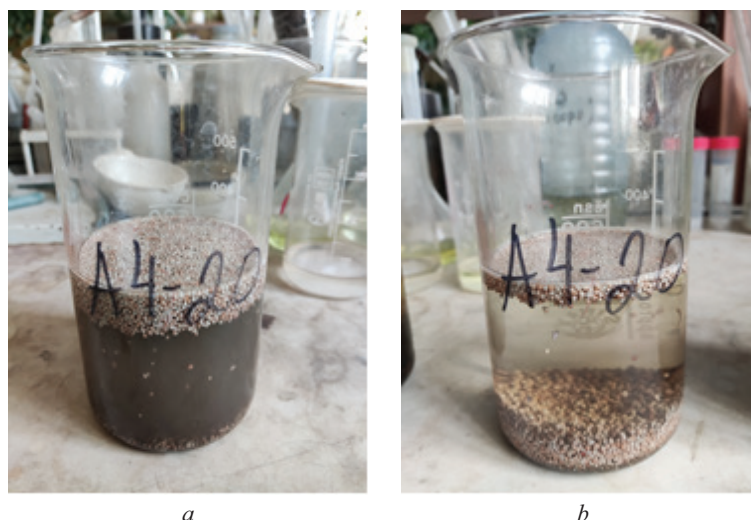


Fig. 3. Study of the sorption of pollutants from the sample: *a* — when the sorbent is in contact with the sorbate for 0 hour; *b* — when the sorbent is in contact with the sorbate for 24 hours

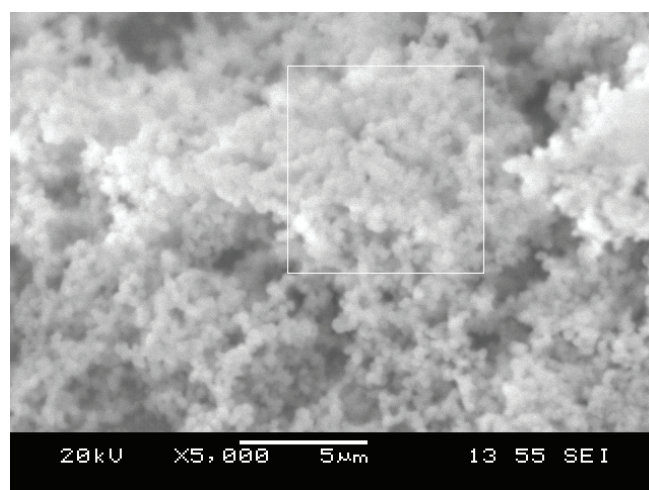


Fig. 4. Microphotograph of the surface of granulated cellular glass and micro X-ray spectral analysis

Table 4. Results of micro X-ray spectral analysis of the sample, %

The element	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe	Zn	Pb
Content, wt. %	40.2	19.44	4.09	7.91	4.11	2.76	1.31	0.91	0.65	0.74	1.34	0.16	0

Studies have shown the high efficiency of granulated cellular glass in the treatment of municipal stormwater from heavy metal cations in static mode.

The sorption capacity of this material is currently being investigated under dynamic conditions, at different temperatures and filtration rates using sorbates containing heavy metals in a wide concentration range. It is intended to use foam glass in the development of composite sorbent in order to reduce the cost of sorption material, as the price of foam glass is currently quite high.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The effectiveness of the sorption capacity of granulated cellular glass in the treatment of surface wastewater from urbanized areas has been investigated.

It is established that in the system “granulated foam glass – waste water” in the static regime the sorption efficiency of cobalt, lead and copper is 100 % and does not depend on the temperature regime and contact time of sorbent with sorbate.

Complete extraction of chromium from stormwater runoff occurs on contact with sorbate for 6 hours at 0–10 °C.

The maximum iron ion sorption degree of 93 % is reached at 0 °C after 168 hours of wastewater contact with the sorbent.

Nickel is only fully extracted from the effluent at a maximum contact time of 168 hours and the temperature regime has no effect on its sorption.

For zinc ions the optimum conditions for 100 % sorption are a temperature of 0 °C and a contact time with the sorbent of 3 hours.

The experimental data obtained showed that granulated foam glass serves as a promising sorption material for heavy metal ions. Earlier studies on the sorption capacity of cellular glass of different nature [21–24] considered the absorption of petroleum products from water. In this paper it was experimentally established that

the mechanism of oil products absorption by foam glass is based on capillary forces, i.e. pores of foam glass are filled with organic pollutants, which cannot be attributed to physical or chemical adsorption processes. Therefore, getting data about sorption interaction in the system “foam glass – surface runoff from urbanized territories” is a new and unknown result. In further studies it is planned to determine technological parameters of the new material (sorption capacity, replacement frequency).

REFERENCES

1. Pichór W., Kamiński A., Szoldra P., Frac M. Lightweight cement mortars with granulated foam glass and waste perlite addition. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-9. DOI: 10.1155/2019/1705490
2. Bessonov I., Bulgakov B., Zhukov A., Gradvov V., Ivanova N., Kodzoev M.B. Lightweight concrete based on crushed foam glass aggregate *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1083(1):012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012038
3. Badretdinova V.T., Serykh T.A. The role of the development of granulated foam glass technology in the development of industry areas of the “green” economy. *Investments, construction, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population : materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2019; 786-789. EDN IRDPZO. (rus.).
4. Dobeš P., Išvold L., Mečár M. Experimental verification of modified sub-ballast layers, application of foam glass boards. *Civil and Environmental Engineering*. 2022; 18(1):367-374. DOI: 10.2478/cee-2022-0034
5. Sopenin G.V. Selection of composition and research of properties of lightweight concrete based on granulated foam glass. *Master's Journal*. 2018; 1:104-111. EDN UZHPTO. (rus.).
6. Zakrevskaya L.V., Popov M.Y. Light concretes on the basis of granulated foam glass. *Architecture. Construction. Education*. 2015; 1(5):26-31. EDN TOKXOJ. (rus.).
7. Melnikov V.P., Melnikova A.A., Ivanov K.S. The use of granular foam-glass ceramic in the Arctic construction of low-rise buildings. *Arctic: Ecology and Economy*. 2022; 12(2):271-280. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280
8. Libor I., Peter D., Holešová M., Deividas N. Assessment of the possibility of foam glass application in the sub-ballast layers. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2023; 29(3):253-267. DOI: 10.3846/jcem.2023.18429
9. Chahour K., Aboutaleb D., Safi B., Mazari T., Zeghad M. Granulated foam glass based on mineral wastes used for building materials. *Building Acoustics*. 2017; 24(4):281-294. DOI: 10.1177/1351010X17739434
10. Karpenko M.A., Tikhomirova I.N. Effective heat- and sound insulating material based on granulated foamglass and mineral binding. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2017; 31(3):43-45. EDN ZRTORH. (rus.).
11. Krasnyuk A., Hromova O., Shcherbak A., Zibrov I. The mechanisms of formation of foam glass structure as an effective insulator for enclosing structures in architectural design of buildings and structures. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*. 2022; 21:44-57. DOI: 10.15802/bttrp2022/258261
12. Modernization of the technology of granulated foam glass and the prospects for the use of the material. *Nanotechnologies in Construction : Scientific Online Journal*. 2013; 5(1):64-76. EDN QABPZH. (rus.).
13. Žurauskienė R., Navickienė L. Foam glass granule usage in tile glue mixtures that use a reduced portland cement amount. *Materials*. 2023; 16(3):1269. DOI: 10.3390/ma16031269
14. Sorokin D.S., Beregovoy V.A. Artificial porous aggregates based on granulated foam glass. *Regional Architecture and Construction*. 2015; 2(23):78-83. EDN UBGTRL. (rus.).
15. Ketov I.A., Slovikov S.V. Syntactic polymeric composite materials highly completed with granulated foam glass *Computational Nanotechnology*. 2019; 6(3):39-46. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-39-46 EDN SZDRQZ. (rus.).
16. Bogatova S.N., Bogatov A.D., Arshinova Yu.D., Pupkov M.N. Water resistance of frame building composites based on granulated foam glass. *XLVII Ogaryov Readings : materials of a scientific conference*. 2019; 119-123. EDN DMHLEL. (rus.).
17. Shiryaev E.V. Shielding the evaporation of a strait of flammable liquids with a granular foam glass substrate. *Problems of technosphere safety : materials of the international scientific-practical conference of young scientists and specialists*. 2020; 9:73-79. (rus.).
18. Kateev R.I., Gazizov M.G., Latypova D.V. Lightweight grouting slurry with granulated foam glass. *Petroleum Engineer*. 2014; 4:5-8. EDN TDOWXN. (rus.).

19. Ivanov K. Use of granulated foam glass ceramics in the bases of transport facilities in the arctic. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 59(1):85-91. DOI: 10.1007/s11204-022-09787-7
20. Go H.W., Moon S.-Y., Kim H.S., Jang S.Y., Kang E.B., Joo J.C. Evaluation of the feasibility of foam glass as filter media in rain garden. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2022; 44(12):603-615. DOI: 10.4491/KSEE.2022.44.12.603
21. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O. Petroleum sorbents from foam glass and oil absorption kinetics. *Theory and Practice of Modern Science : materials of the IX International scientific and practical conference*. 2013; 36-41. (rus.).
22. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Chernyaev V.A. Oil sorbents from polyurethane foams and oil absorption kinetics. *Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2013; 5:26-30. EDN RAFOYT. (rus.).
23. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chernyaev V.A. The use of foam glass and polymeric materials as effective oil sorbents. *Glass and Ceramics*. 2013; 12:3-7. EDN RVPVPSX. (rus.).
24. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chernyaev V.A. Foam glass and polymer materials: effective oil sorbents. *Glass and Ceramics*. 2014; 70(11-12): 425-428. DOI: 10.1007/s10717-014-9594-1

Received May 16, 2023.

Adopted in revised form on June 2, 2023.

Approved for publication on June 13, 2023.

Bionotes: **Olesya A. Samodolova** — postgraduate student of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1124060; samodolova@mail.ru;

Dmitrii V. Ulrikh — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 562874, ORCID: 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Tatiana M. Lonzingier — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Associate Professor of the Department of Physical Chemistry of Materials; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 730964; lonzingierm@susu.ru;

Sergey E. Denisov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; denisovse@susu.ru.

Author contributions:

Olesya A. Samodolova — provided ideas for the study, collected materials, and wrote the source text.

Dmitrii V. Ulrikh — provided scientific supervision, assisted in writing the article, provided a summary of the collected materials, and finalized the text.

Tatiana M. Lonzingier — assisted in summarizing the collected materials and finalizing the text.

Sergey E. Denisov — assisted in summarizing the collected materials and finalizing the text.

The authors declare no conflict of interest.