

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов Water supply, sewage, water conservation construction systems

Научная статья
УДК 628.16
DOI: 10.14529/build260106

УТИЛИЗАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ ДЛЯ ЛИТЬЯ КАК ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

М.Г. Новосёлов¹, М.Ю. Белканова²

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

✉ belkanovami@susu.ru

Аннотация. Отходы от металлургических и сталелитейных предприятий составляют значительный объем и являются источником экологического загрязнения за счет склонности к выщелачиванию при хранении. Вместе с тем такие отходы имеют потенциал применения в качестве фильтрующих сред для очистки промышленных сточных вод. В данной статье изложены результаты исследований зернистого фильтрующего материала, полученного из измельченных керамических форм, которые являются технологическими отходами литья по выжигаемым моделям на предприятии Южного Урала. Форма для литья изготавливается из местного шамотно-каолинового сырья и прокаливается при температуре 900–1000 °С в течение 40–60 минут. При извлечении отливки форма разбивается и выбрасывается в отходы. Утилизация этого отхода в качестве зернистого фильтрующего материала или адсорбента стала целью данного исследования. Для этого образцы подвергли дроблению и рассеву, пробы материала испытывали на соответствие требованиям к фильтрующим зернистым материалам. Сорбционные свойства изучали на образцах двух фракций 0,315–0,8 мм и 0,63–1,4 мм. Химический состав пробы изучен методом энергодисперсионной спектроскопии, силикатный модуль материала составляет 0,75, что является характерной величиной для адсорбентов. Морфологический анализ поверхности зерен, выполненный с помощью метода растровой электронной микроскопии, показал высокую шероховатость и пористость материала, которая убывает с уменьшением размера зерна. Пробы материала показали высокую механическую стойкость. Однако установлена низкая химическая стойкость материала в кислой и щелочной средах. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье показала схожесть спектров образцов зернистого фильтрующего материала, полученного из измельченных керамических форм и Сорбента АС, что позволяет относить их к одной группе – силикаты.

Ключевые слова: отходы литейных форм, зернистый фильтрующий материал, адсорбент

Для цитирования. Новосёлов М.Г., Белканова М.Ю. Утилизация керамических форм для литья как фильтрующего материала // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2026. Т. 26, № 1. С. 50–57. DOI: 10.14529/build260106

Original article
DOI: 10.14529/build260106

DISPOSAL OF CERAMIC CASTING MOLDS AS A FILTERING MATERIAL

M.G. Novoselov¹, M.Yu. Belkanova²

¹ South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ belkanovami@susu.ru

Abstract. Wastes generated by metallurgical and steelmaking plants constitute a significant volume and represent a source of environmental pollution due to their tendency to leach during storage. At the same time, such wastes have

© Новосёлов М.Г., Белканова М.Ю., 2025.

potential for application as filtering media for the treatment of industrial wastewater. This article presents the results of studies of granular filtering material obtained from crushed ceramic molds, which are technological wastes from casting using burnt models at an industrial facility in the South Ural Region. The casting molds are made from local fireclay-kaolin raw materials and are fired at a temperature of 900–1000 °C for 40–60 minutes. When the casting is removed, the mold is broken and discarded. The utilization of this waste as a granular filtering material or adsorbent is the primary objective of this study. For this purpose, the samples have been crushed and sieved, and the material samples have been tested for compliance with the requirements for granular filtering materials.

The sorption properties are studied on samples of two fractions of 0.315–0.8 mm and 0.63–1.4 mm. The chemical composition of the samples are studied using energy-dispersive spectrometry; the silicate modulus of the material has been found to be 0.75, which is characteristic of adsorbents. Morphological analysis of the grain surface, performed using scanning electron microscopy, showed high roughness and porosity of the material, which decrease with decreasing grain size. The material samples showed high mechanical resistance. However, low chemical resistance of the material in acidic and alkaline environments has been observed. Fourier-transform infrared spectroscopy has shown the similarity between the spectra of the granular filtering material samples obtained from crushed ceramic forms and those of Adsorbent AS, indicating that they belong to the same group of materials – silicates.

Keywords: casting mold waste, granular filtering material, adsorbent

For citation. Novoselov M.G., Belkanova M.Yu. Disposal of ceramic casting molds as a filtering material. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2026;26(1):50–57. (in Russ.). DOI: 10.14529/build260106

Введение

Месторождения ресурсов для производства традиционных зернистых фильтрующих материалов (ЗФМ) истощаются [1, 2]. Сложный состав загрязнений очищаемых вод требует синтеза новых адсорбентов [3]. В связи с этим поиск альтернативных ресурсов для производства ЗФМ и адсорбентов является актуальной задачей. С другой стороны, отходы от металлургических и сталелитейных предприятий составляют значительный объем и являются источником экологического загрязнения. Например, на одну тонну производимой в России стали приходится 0,406 т твердых отходов [4].

Существует несколько подходов к проблеме утилизации производственных отходов [5, 6]: получение адсорбентов, коагулянтов, фильтрующих материалов, сырья для строительной отрасли [7], очистки воды на основе нанотехнологий [8] и др. Однако в большинстве случаев объемы накопленных отходов продолжают увеличиваться [5]. Отходы литейного производства склонны к выщелачиванию при хранении, что негативно влияет на окружающую среду. Применение отходов в качестве фильтрующих материалов также может сопровождаться их выщелачиванием, что требует тщательного анализа фильтратов [9] для оценки возможности применения отходов для производства фильтрующих материалов. Загрязнение подземных вод промышленными отходами приводит к необходимости удаления из них нефтепродуктов, азотных соединений, марганца, кремния, солей жесткости, фтора, сероводорода, железа и пересмотру (усовершенствованию) традиционных технологий очистки подземных вод [10].

Одной из передовых технологий производства отливок является литье по выжигаемым моделям. Эта технология реализована на одном предприятии Южного Урала. Форма для отливки стали изготавливается из кремнезоля и местного шамотно-каолинового сырья [11]. После отливки стали

образуется бой керамических форм, который складывается как промышленный отход (рис. 1) далее по тексту отходы керамики (ОК). Технология литья по выжигаемым моделям считается перспективной [11], что может увеличить в будущем объем отходов литейных форм.

Технология литья по выжигаемым моделям включает следующие этапы [11]: приготовление керамической суспензии; нанесение суспензии на модель и обсыпка огнеупорным материалом; сушка нанесенного слоя при температуре 40–50 °C; формирование огнеупорных слоев в требуемом количестве; выжигание модели и прокатка формы при 900–1000 °C в течение 40–60 мин; заливка металлом. Для формовки используют водный раствор кремнезоля, содержащий 30–35 % этилсиликата ЭТС-40 и 65–70 % наполнителя фракцией 10–50 мкм. В качестве наполнителя применяют муллитизированный порошкообразный материал, полученный термической обработкой местного шамотно-каолинового сырья.



Рис. 1. Крупный бой форм для литья

Похожим способом образуется метакаолин в процессе прокаливания каолина (оксида алюминия и оксида кремния) при температуре 700–1000 °С, а последующая гидротермальная обработка едким натром NaOH образует цеолит [12]. Значит, отходы литейных форм могут иметь свойства, присущие алюмосиликатам и могут рассматриваться в качестве материала для производства цеолита.

Целью данной работы является исследование возможности изготовления ЗФМ и адсорбентов из технологических отходов литья по выжигаемым моделям. Поставленная цель достигается решением комплекса задач [13] в отношении отходов литейных форм: изучение химического состава; проведение гранулометрического анализа; изучение основных физико-химических свойств; изучение фильтрующих и сорбционных свойств.

Материалы и методы

Физические характеристики и физико-химические показатели исследуемого материала определяли по ГОСТ Р 51641-2000 «Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия». Для получения усредненной пробы образцы исследуемого материала отбирали в различные дни работы предприятия из нескольких партий литья в общем количестве 20 кг. Образцы дробились на истирателе дисковым ИД 200 с зазором между дисками 1,2 мм и рассеивались на комплекте сит, имеющих сетки по ГОСТ 6613-86 «Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия». Фракция с каждого сита взвешивалась на лабораторных электронных весах M-ER 326 AFU.

Для анализа поверхности зерна исследуемого материала применяли растровую электронную микроскопию высокого разрешения. Локальный анализ элементного состава пробы проведен методом энергодисперсионной спектроскопии (EDX). Анализ среднего химического состава пробы выполнен методом спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Истинная плотность материала определялась с помощью гелиевого пикнометра AccuPyc 1340 (Micromeritics, США) с ячейкой 10 см³, масса навески 9 г. Определение функциональных групп в химических соединениях образцов выполнено с помощью метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье.

Используемые измерительные приборы и оборудование: комплекс сканирующей электронной микроскопии Jeol JSM 700IF, EDS Oxford INCA X-max 80, WDS Oxford INCA WAVE, EBSD и HKL, спектрометр эмиссионный OPTIMA 2100DV Perkin Elmer, США, в качестве фонового раствора применяли воду глубокой очистки, полученную на приборе Simplicity UV, Фурье-спектрометр инфракрасный ФСМ2201 в диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. При Фурье-спектроскопии каждый образец был смешан с бромидом калия в соотношении 1:10 по массе, измельчен и спрессован в таблетку. Данные спектра обработаны с помощью программного обеспечения FSрес и MATLAB.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав исследуемого материала представлен на рис. 2, а его физические характеристики – в табл. 1. Более 50 % отсева при-

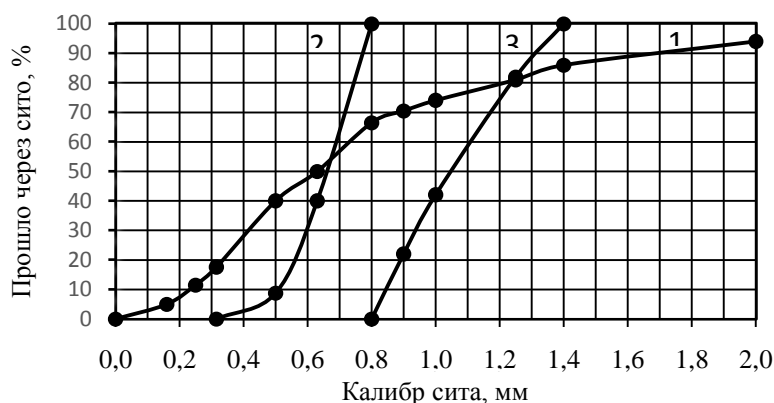


Рис. 2. Результаты ситового анализа отходов форм литья: 1 – исходная проба после отсева на ситах 0,315–2,0; 2 – после отсева на ситах 0,315–0,8; 3 – после отсева на ситах 0,63–1,4

Таблица 1

Физические характеристики материала

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Значение
1	Эквивалентный диаметр, $d_{э\text{кв}}$	мм	0,52
2	Коэффициент неоднородности, K_n	–	5,6
3	Коэффициент неоднородности, R	–	0,58
4	Плотность	г/см ³	2000
5	Насыпная плотность	г/см ³	1100

ходило на фракцию менее 0,63 мм. Это значит, что при серийном производстве может наблюдаться большая потеря материала в виде отходов. Предпочтительная фракция зернистой загрузки для фильтров – 0,5–2,0 мм [1, 2]. Проба материала, полученная дроблением на дисковом истирателе отходов литейных форм, имела $d_{10} = 0,23$ мм, $d_{80} = 1,21$ мм, коэффициент неоднородности ($K_n = d_{80}/d_{10}$) $K_n = 5,3$, эквивалентный диаметр $d_{экв} = 0,52$ мм и коэффициент неоднородности ($R = d_{20}/d_{экв}$) $R = 0,58$. Рекомендуется [1] загружать фильтры зернистым фильтрующим материалом с коэффициентом неоднородности $K_n \leq 2$, коэффициент неоднородности R для нисходящего фильтрации рекомендуется $R < 1$. Для удовлетворения этому требованию материал рассеяли на среднезернистую (рис. 2, кривая 2) и крупнозернистую (рис. 2, кривая 3) загрузки, крупные и мелкие

фракции удалили [2]. Тогда для фракции 0,315–0,8 мм коэффициенты неоднородности составили $K = 1,45$ и $R = 0,9$, а для фракции 0,63–1,4 мм $K = 1,73$ и $R = 0,8$.

Средний химический состав отходов форм для литья представлен в табл. 2 в сравнении с глауконитом Каринского месторождения [14] и товарным продуктом Сорбентом АС [15]. Элементный состав этих материалов определялся методом энергодисперсионной спектроскопии (EDX) и представлен в табл. 3.

В отходах литейных форм преобладают диоксид кремния (40,1 %) и оксид алюминия (51,7 %), их соотношение составляет величину силикатного модуля менее единицы (0,75).

На рис. 3 представлены микрофотографии отходов литейных форм фракций 0,315–0,8 мм и 0,63–1,4 мм соответственно. Морфологический

Средний химический состав исследуемого материала, масс. %

Таблица 2

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Остальное	Σ	SiO ₂ / (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)
ОК	40,1	51,7	–	1,52	0,09	0,35	6,24	100,0	0,75
Глауконит	70,8	4,02	1,43	10,1	3,60	1,87	8,18	100,0	5,01
Сорбент АС	78	7	–	5	–	0,5	9,5	100,0	6,5

Элементный состав исследуемых материалов

Таблица 3

Материал	Элементы в весовых %								Σ
	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Ti	
ОК	39,12	0,12	24,42	32,82	0,7	0,12	2,02	0,68	100,00
Глауконит	37,23	1,66	6,02	38,22	3,02	1,18	12,67	–	100,00
Сорбент АС	39,73	0,82	4,26	49,40	1,22	0,68	3,89	–	100,00

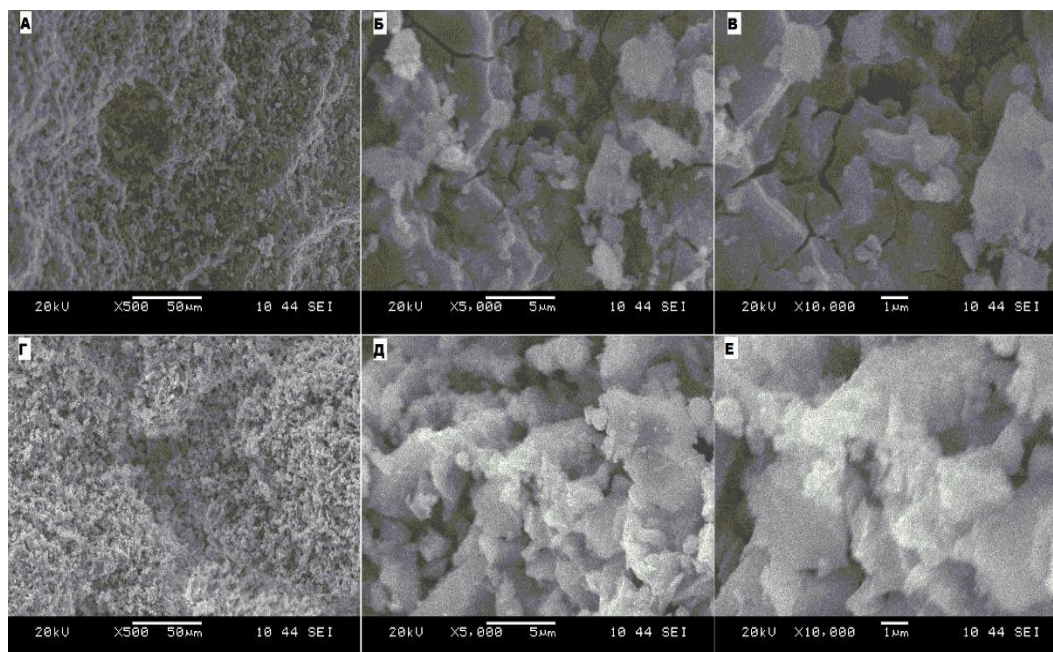


Рис. 3. Морфология поверхности материала:
А, Б, В – фракция 0,315–0,8 мм; Г, Д, Е – фракция 0,63–1,4 мм

анализ описывает размер, форму и пространственную организацию поверхности материала и представляется тремя уровнями организации [16]: первый уровень – увеличение в 500 раз; второй уровень – в 5000 раз; третий уровень – в 10000 раз. Для среднезернистой фракции 0,315–0,8 мм на первом уровне организации (рис. 3А) поверхность зерна шероховатая, имеет углубления 10–50 мкм, в которых при дальнейшем увеличении просматриваются фрагменты, соответствующие второму уровню организации частиц. Второй уровень (рис. 3Б) представлен частицами остроконечной неправильной формы размерами 1–5 мкм, выступающими над поверхностью основного тела зерна материала, которая рассечена трещинами размером до 5 мкм. На третьем уровне организации (рис. 3В) отчетливо видны трещины на поверхности основного тела зерна материала, их ширина достигает 0,5 мкм, просматривается глубина 0,1–0,3 мкм, выступающие на поверхности частицы размерами 1–5 мкм приобретают объемный вид, между ними присутствуют частицы ещё меньшего размера 0,1–1 мкм. Имеются поры различных размеров, образованные трещинами в пластинчатых элементах материала.

Для крупнозернистой загрузки фракции 0,63–1,4 мм на первом уровне организации (рис. 3Г) поверхность зерна более шероховатая, чем на рис. 3А, имеет углубления 10–50 мкм, в которых при дальнейшем увеличении просматриваются элементы, соответствующие второму уровню организации частиц. Второй уровень (рис. 3Д) представлен частицами остроконечной неправильной формы размерами 1–5 мкм, за частицами не просматривается базовая поверхность, как на рис. 3Б. На третьем уровне организации (рис. 3Е) выступающие на поверхности частицы размерами 1–5 мкм приобретают объемный вид, между ними

присутствуют частицы ещё меньшего размера 0,1–1 мкм. Имеются поры различных размеров, образованные соединением между собой пластинчатых элементов и трещинами.

При сравнении микроснимков поверхности зерен разной крупности в одной кратности увеличения заметно, что поверхность крупного зерна плотнее усеяна кристаллами и чешуйками различной формы, чем поверхность среднего зерна. Вероятно, при дроблении материала происходила его деструкция с частичной потерей элементов с поверхности. Из рис. 3 видно, что второй (Б, Д) и третий (В, Е) уровни организации очень схожи, т. е. третий уровень повторяет второй, следовательно, материал имеет два уровня организации [16].

В табл. 4 представлены результаты испытания отходов литейных форм на химическую стойкость и механическую прочность.

Исследуемый материал химически стоек в нейтральной среде (раствор 3) и может использоваться при очистке природных вод. В кислой и щелочной среде наблюдается разрушение материала, что указывает на непригодность исследуемого материала для очистки промышленных стоков.

На рис. 4 представлен ИК-спектр исследуемых образцов ОК и Сорбента АС. Средний химический состав образцов, представленных в табл. 2, показывает для ОК содержание SiO_2 – 40,1 %, Al_2O_3 – 51,7 %, для Сорбента АС SiO_2 – 78 %, Al_2O_3 – 7 %. Из химического состава следует, что в образцах не присутствуют группировки С-Н, S-Н, N-Н, Cl-Н и F-Н, кроме OH_n -группировок [17]. Первая группировка характеризуется полосами поглощения в диапазоне 3300–3650 см^{-1} , вторая группировка характеризуется полосами поглощения в диапазоне 1000–1250 см^{-1} , третья группировка характеризуется полосами пропускания

Таблица 4

Химическая стойкость и механическая прочность отходов литейных форм

№ п/п	Показатель	Значение					Норма по ГОСТ Р 51641-2000
		Раствор					
1	Химическая стойкость в модельных растворах	1	2	3	4	5	
1.1	Прирост окисляемости, мг/дм ³	0,67	0,96	1,44	0	0	Не более 10
1.2	Прирост массовой концентрации кремниевой кислоты в пересчете на кремний, мг/дм ³	1,79	11,68	1,41	0,24	0	Не более 10
1.3	Прирост сухого остатка, мг/дм ³	116,4	0	0	28,8	30,8	Не более 20
1.4	Прирост суммарной массовой концентрации алюминия и железа в пересчете на оксиды (III), мг/дм ³	6,10	1,62	0,01	0,03	0	Не более 2,0
2	Механическая прочность						
2.1	Измельчаемость, %	0,28	0,38	0,33	0,43	0,34	Не более 4
2.2	Истираемость, %	0,04	0,07	0,05	0,05	0,04	Не более 0,5

Примечание. 1 – раствор соляной кислоты, 2 – раствор гидроксида натрия, 3 – раствор хлористого натрия, 4 – раствор гипохлорита кальция, 5 – вода дистиллированная.

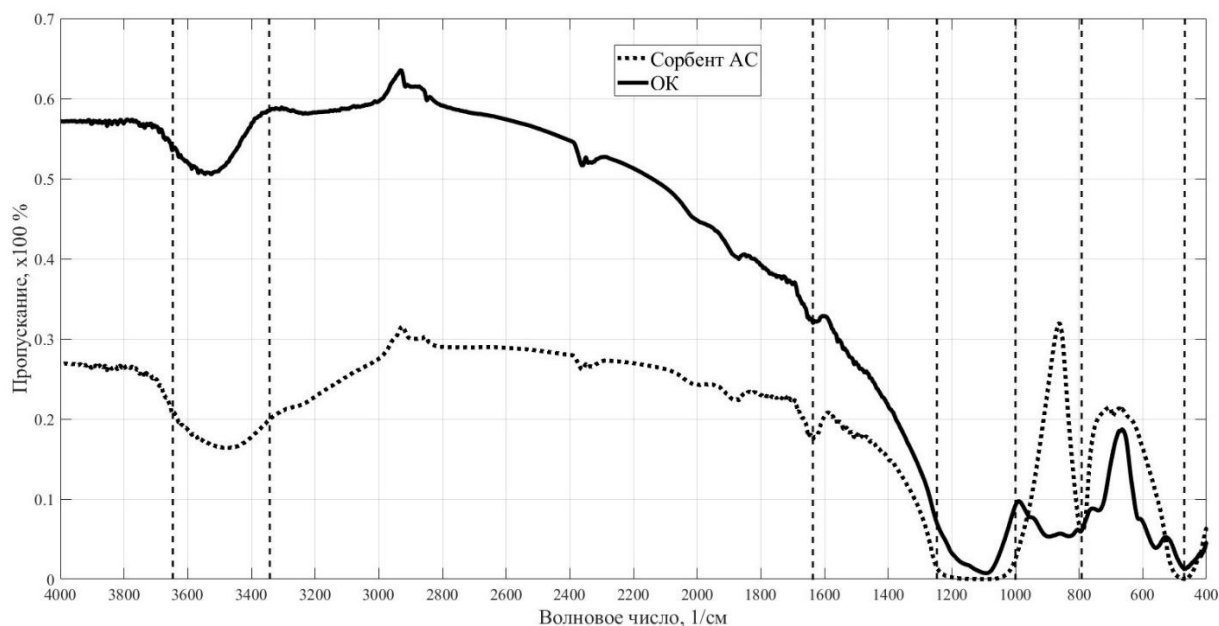


Рис. 4. Инфракрасные спектры пропускания для ОК и Сорбента АС

в диапазоне $800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$. В первом диапазоне наблюдаются валентные колебания связанной молекулы воды, Н-О-Н и Si-ОН. Во втором диапазоне наблюдаются деформационные колебания Si-O. Третий диапазон – это деформационные колебания Al-O и Al-ОН. Кроме того, есть отдельные пики деформационных колебаний ОН при волновых числах 1650 и 450 см^{-1} . Схожесть кривых спектра и различие в площадях под кривыми в диапазоне от 1200 до 4000 см^{-1} обосновано присутствием диоксида кремния, который поглощает инфракрасное излучение. Существенное различие спектров в диапазоне $800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ обусловлено содержанием в образцах Al_2O_3 .

Выводы

В работе изучена возможность изготовления из отходов литейных форм зернистого фильтрующего материала для очистки воды. Получены фракции $0,315\text{--}2,0$, $0,315\text{--}0,8$ и $0,63\text{--}1,4$ мм, определены их физико-химические показатели. На основании исследования сделаны следующие выводы:

1. Отходы литейных форм хорошо поддаются дроблению на дисковом истирателе. При зазоре между дисками, равном $1,2$ мм, более 50% отсева приходилось на фракцию менее $0,63$ мм. Это зна-

чит, что при серийном производстве могут наблюдаться большие потери материала.

2. Наилучшие характеристики имеют фракции $0,315\text{--}0,8$ мм – $K = 1,45$, $R = 0,9$ и $0,63\text{--}1,4$ мм – $K = 1,73$, $R = 0,8$. Оба образца подходят для нисходящего фильтрования.

3. Силикатный модуль $0,75 < 1$ характеризует исследуемый материал как потенциальный адсорбент. Морфологический анализ поверхности зерен фракций $0,315\text{--}0,8$ мм и $0,63\text{--}1,4$ мм показал два уровня организации. На первом уровне присутствует шероховатость поверхности. На втором уровне присутствуют поры между частицами на поверхности.

4. Полученный из отходов литейных форм образец фракции $0,315\text{--}2,0$ мм показал высокую механическую прочность и низкую химическую стойкость в кислой и щелочной среде. Материал может использоваться для фильтрования нейтральных водных сред.

5. ИК-спектры показали схожесть спектров образцов ОК и Сорбента АС, что подтверждает их алюмосиликатную природу.

Таким образом, отходы литейных форм могут использоваться как фильтрующая среда и имеют потенциал применения в качестве адсорбента после дополнительных исследований.

Список литературы

1. Аюкаев Р.И., Мельцер В.З. Производство и применение фильтрующих материалов для очистки воды: справочное пособие. Л.: Стройиздат, 1985. 120 с.
2. Дзюбо В.В., Алферова Л.И. Фильтрующие материалы на основе природного и технологического сырья, пригодные для целей водоподготовки в Сибирском регионе // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2009. № 8 (20). С. 25–35.

3. Aouan B., Alehyen S., Fadil M., El Alouani M., Saufi H., El Herradi E.H., El Makhoukhi F., Taibi M. Development and optimization of geopolymer adsorbent for water treatment: Application of mixture design approach // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 338, 117853. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117853
4. Журавлев А.А., Гасанов Р.Р. Техногенные отходы и затраты на охрану окружающей среды в черной металлургии РФ // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с международным участием, Екатеринбург, 17–18 мая 2018 года. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. С. 104–111.*
5. Sahu J.N., Kapelyushin Y., Mishra D.P., Ghosh P., Sahoo B.K., Trofimov E., Meikap B.C. Utilization of ferrous slags as coagulants, filters, adsorbents, neutralizers/stabilizers, catalysts, additives, and bed materials for water and wastewater treatment: A review // *Chemosphere*. 2023. Vol. 325, 138201. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138201
6. Shi Ch., Wang X., Zhou S., Zuo X., Wang C. Mechanism, application, influencing factors and environmental benefit assessment of steel slag in removing pollutants from water: A review // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 47, 102666. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102666
7. Jia Z., Aguiar J., de Jesus C., Castro F., Cunha S. Physical and mechanical properties of lightweight concrete with incorporation of ceramic mold casting waste // *Materialia*. 2023. Vol. 28 (14), 101765. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101765
8. Jjagwe J., Olupot P.W., Carrara S. Iron oxide nanoparticles/nanocomposites derived from steel and iron wastes for water treatment: A review // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 343, 118236. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118236
9. Siddique R., Kaur G., Rajor A. Waste foundry sand and its leachate characteristics // *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 54, no. 12, pp. 1027–036. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.04.006
10. Журба М.Г. Водоснабжение: проблемы развития // *Коммунальный комплекс России*. 2011. № 2 (80). С. 24–27.
11. Знаменский Л.Г., Сеницын Е.А., Ермоленко А.А., Захаров Н.А. Литье по выжигаемым моделям с применением неорганических материалов // *Литейное производство*. 2023. № 1. С. 28–32.
12. Vigil de la Villa Mencía R., Goiti E., Ocejó M., Giménez R.G. Synthesis of zeolite type analcime from industrial wastes // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020. Vol. 293, 109817. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.109817
13. Назаренко М.Ю., Кондрашева Н.К., Салтыкова С.Н. Эффективность применения горючих сланцев и сланцевольных отходов для очистки воды от органических загрязнителей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327, № 9. С. 95–103.
14. Григорьева Е.А. Сорбционные свойства глауконита Каринского месторождения: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2004. 140 с.
15. Баранова О.Ю. Защита водных объектов от техногенных радионуклидов сорбентами на основе опалкритобалитовых пород: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2006. 145 с.
16. Бондарев А.В., Жилиякова Е.Т., Демина Н.Б., Новиков В.Ю. Исследование морфологии сорбционных веществ // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2019. Т. 8, № 2. С. 33–37. DOI: 10.33380/2305-2066-2019-8-2-33-37
17. Кравцов С.Л. О применении данных дистанционного зондирования земли в геологии // *Информатика. Объединенный институт проблем информатики НАН Белорусии*. 2008. № 3. С. 70–80.

References

1. Ayukeyev R.I., Mel'tser V.Z. *Proizvodstvo i primeneniye fil'truyushchikh materialov dlya ochistki vody: spravochnoe posobie* [Production and application of filtering materials for water purification: reference book]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1985. 120 p. (in Russ.)
2. Dzyubo V.V., Alferova L.I. [Filter materials based on natural and technological raw materials, suitable for water treatment purposes in the Siberian region]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie* [Water purification. Water treatment. Water supply], 2009, no. 8 (20), pp. 25–35. (in Russ.)
3. Aouan B., Alehyen S., Fadil M., El Alouani M., Saufi H., El Herradi E.H., El Makhoukhi F., Taibi M. Development and optimization of geopolymer adsorbent for water treatment: Application of mixture design approach. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 338, 117853. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117853
4. Zhuravlev A.A., Gasanov R.R. [Man-made waste and environmental protection costs in the ferrous metallurgy of the Russian Federation]. In: *Teplootekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: Sbornik dokladov VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonykh (TIM'2018) s mezhdunarodnym uchastiem, Ekaterinburg, 17–18 maya 2018 goda* [Thermal Engineering and Computer Science in Education, Science, and Production: Collection of papers from the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students, and Young Scientists (TIM'2018) with International Participation, Yekaterinburg, May 17–18, 2018]. Ekaterinburg, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, 2018, pp. 104–111. (in Russ.)

5. Sahu J.N., Kapelyushin Y., Mishra D.P., Ghosh P., Sahoo B.K., Trofimov E., Meikap B.C. Utilization of ferrous slags as coagulants, filters, adsorbents, neutralizers/stabilizers, catalysts, additives, and bed materials for water and wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 2023, vol. 325, 138201. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138201
6. Shi Ch., Wang X., Zhou S., Zuo X., Wang C. Mechanism, application, influencing factors and environmental benefit assessment of steel slag in removing pollutants from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 47, 102666. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102666
7. Jia Z., Aguiar J., de Jesus C., Castro F., Cunha S. Physical and mechanical properties of lightweight concrete with incorporation of ceramic mold casting waste. *Materialia*, 2023, vol. 28 (14), 101765. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101765
8. Jjagwe J., Olupot P.W., Carrara S. Iron oxide nanoparticles/nanocomposites derived from steel and iron wastes for water treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 343, pp. 118236. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118236
9. Siddique R., Kaur G., Rajor A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, vol. 54, no. 12, pp. 1027–036. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.04.006
10. Zhurba M.G. [Water supply: development problems]. *Kommunal'nyj kompleks Rossii* [Communal complex of Russia], 2011, no. 2 (80), pp. 24–27. (in Russ.)
11. Znamenskij L.G., Sinicyn E.A., Ermolenko A.A., Zaharov N.A. [Casting using burnt models using inorganic materials]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry], 2023, no. 1, pp. 28–32. (in Russ.)
12. Vigil de la Villa Mencía R., Goiti E., Ocejó M., Giménez R.G. Synthesis of zeolite type analcime from industrial wastes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, vol. 293, 109817. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.109817
13. Nazarenko M.Yu., Kondrasheva N.K., Saltykova S.N. [Efficiency of using oil shale and shale ash waste for water purification from organic pollutants]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources], 2016, vol. 327, no. 9, pp. 95–103. (in Russ.)
14. Grigor'eva E.A. Sorbcionnye svoystva glaukonita Karinskogo mestorozhdeniya: diss. ... kand. tekhn. nauk [Sorption properties of glauconite from the Karinsky deposit. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk; 2004. 140 p. (in Russ.)
15. Baranova O.Yu. Zashchita vodnyh ob"ektov ot tekhnogennykh radionuklidov sorbentami na osnove opalkristobalitovykh porod: diss. ... kand. tekhn. nauk. [Protection of water bodies from man-made radionuclides using sorbents based on opalcristobalite rocks. Cand. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2006. 145 p. (in Russ.)
16. Bondarev A.V., Zhilyakova E.T., Demina N.B., Novikov V.Yu. [Study of the morphology of sorption substances]. *Razrabotka i registraciya lekarstvennykh sredstv* [Development and registration of medicinal products], 2019, vol. 8, no. 2, pp. 33–37. (in Russ.). DOI: 10.33380/2305-2066-2019-8-2-33-37
17. Kravcov S.L. [On the application of remote sensing data in geology]. *Informatika. Ob"edinennyj institut problem informatiki NAN Belorusii* [Informatics. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus], 2008, no. 3, pp. 70–80. (in Russ.)

Информация об авторах:

Новосёлов Максим Григорьевич, аспирант, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия; maximnovoselov220@gmail.com

Белканова Марина Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; belkanovami@susu.ru

Information about the authors:

Maxim G. Novoselov, postgraduate, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia; maximnovoselov220@gmail.com

Marina Yu. Belkanova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; belkanovami@susu.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2025, принята к публикации 20.09.2025.

The article was submitted 01.09.2025, approved after reviewing 20.09.2025.