

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-111-117>

УДК 627.5: 504.4.054



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАСЫПНЫХ СОРБИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

И.В. Глазунова^{1,2}, Кабтул Хала¹, М.А. Ширяева^{1,3}

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

³ Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора; 141014, г. Мытищи, ул. Семашко, 2, Россия

Аннотация. Цель исследований заключается в изучении фильтрационных свойств насыпных сорбирующих материалов для оценки возможностей их применения в условиях жаркого климата. Выполнен анализ проблем загрязнения реки Барады остатками нефтепродуктов, промышленных территорий, свалками на берегах и последствиями нефтедобычи. Собраны и обобщены данные по использованию сорбентов в России и Сирии для снижения загрязняющей нагрузки на реки. Выявлены проблемы, возникающие при применении сорбентов для снижения загрязняющей нагрузки на территории и водные объекты. Основными проблемами являются изменение фильтрационной способности в условиях жарких температур и снижение продолжительности срока службы сорбента при использовании в сооружениях. Выполнено планирование эксперимента для исследования фильтрационных свойств насыпных сорбентов при различных температурах теплого и жаркого климата. Проведен сравнительный анализ характеристик насыпных сорбентов и выбран сорбент для исследований. Выполнена статистическая обработка результатов лабораторных экспериментов и определен рекомендуемый диапазон температур использования исследуемого сорбента.

Ключевые слова: насыпные сорбенты, фильтрационные свойства, остатки нефтепродуктов, планирование эксперимента, температура воды

Формат цитирования: Глазунова И.В., Кабтул Хала, Ширяева М.А. Исследование фильтрационных свойств насыпных сорбирующих материалов с целью их применения в условиях жаркого климата для очистки воды от нефтепродуктов // Природообустройство. 2025. № 4. С. 111-117. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-111-117>

Original article

FILTRATION PROPERTIES STUDY OF BULK SORBING MATERIALS FOR THE USE IN HOT CLIMATE FOR WATER PURIFICATION FROM OIL PRODUCTS

I.V. Glazunova¹, Kabtoul Hala¹, M.A. Shiryayeva^{1,2}

¹ Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

² Federal State Budgetary Institution “Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov”; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building 2, Russia

³ Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of Rosпотребнадзор; 141014, Mytishchi, Semashko str., 2, Russia

Abstract. The aim of this study is to investigate the filtration properties of bulk sorbent materials to assess their potential applications in hot climate conditions. An analysis was conducted on the pollution issues of the Barada River caused by petroleum residues, which originate from industrial zones, waste dumps along the riverbanks, and the consequences of oil extraction. Data on the use of sorbents in Russia and Syria for reducing river pollution have been collected and summarized. The study identifies challenges associated with the use of sorbents for mitigating pollution in both terrestrial and aquatic environments. The primary issues include changes in filtration capacity under high-temperature conditions and the reduced service life of sorbents when used in engineering structures. An experimental plan was

developed to study the filtration properties of bulk sorbents at various temperatures characteristic of warm and hot climates. A comparative analysis of the properties of different bulk sorbents was performed, leading to the selection of a sorbent for further research. Statistical processing of laboratory experiment results was conducted, and a recommended temperature range for the effective use of the investigated sorbent was determined.

Keywords: bulk sorbents, filtration petroleum, petroleum residues, experimental design, water temperature

Format of citation: Glazunova I.V., Kabtoul Hala, Ширяева М.А. Filtration properties study of bulk sorbing materials for the use in hot climate for water purification from oil products // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 4. P. 111-117. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-111-117>

Введение. При проведении анализа проблем водопользования для бассейна реки Барады (Сирия) было выявлено, что одной из основных причин загрязнения реки является поступление загрязненных диффузных стоков с территорий свалок и промышленных зон на ее берегах [1]. Такая ситуация образовалась в период войны, происходившей в стране. Исправить и восстановить качество воды в реке Бараде до категории «Чистая» можно посредством очистки загрязненных диффузных стоков с территорий свалок и промышленных зон, что, по прогнозным расчетам, позволит снизить загрязняющую нагрузку на реку до 30% от существующей [1]. Проблема свалок у рек в Сирии связана с неправильным управлением отходами. До войны система обращения с ними в стране была слабой, и примерно 80% твердых бытовых отходов размещалось на открытых свалках на окраинах городов. В результате неправильного обращения с отходами загрязнялись вода, почва и воздух [2, 3]. Также в 2020-е гг. российские и сирийские ученые обнаружили загрязнение рек углеводородами, в том числе нефтью, по причине добычи нефти американскими компаниями. Отходы нефтяных месторождений, на которых работают американские компании, нередко оказываются в реках, из которых поступает питьевая вода для жителей многих населенных пунктов [3].

В мире, как известно, самыми эффективными способами снижения последствий нефтяных

загрязнений являются способы, в которых используются различные сорбирующие материалы [4]. Для очистки территорий и водных объектов используются как насыпные, волокнистые, так и комбинированные сорбирующие материалы [5]. Выполненный анализ сравнительной эффективности насыпных сорбентов позволил выбрать для лабораторных исследований сорбент, который, по данным разработчиков, в гранулированном виде в локальных очистных сооружениях имеет эффективность очистки 88% и невысокую стоимость [6].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики насыпных сорбентов для очистки воды от остатков нефтепродуктов.

Цель исследований: изучение фильтрационных свойств насыпных сорбирующих материалов для оценки возможностей их применения в условиях жаркого климата.

Материалы и методы исследований. Акцент в исследованиях сделан на применение сорбентомелиорантов для очистки диффузных стоков в жарком климате. В этих целях дальнейшие исследования посвящены изучению гидравлических фильтрационных параметров различных сорбентов и их возможным изменениям в зависимости от температуры.

Как известно, водопроницаемость сорбирующих фильтрующих материалов (СФМ) есть функция следующих их структурных характеристик: пористость, размеры пор, толщина

Таблица 1. Сравнительные характеристики насыпных сорбентов для очистки воды от остатков нефтепродуктов

Table 1. Comparative characteristics of bulk sorbents for water purification from petroleum residues

Насыпной сорбент <i>Bulk sorbent</i>	Натуральный грунт (песок) <i>Natural soil (sand)</i>	Сапропель гранулированный <i>Granulated sapropel</i>	Торф <i>Peat</i>	Уголь активированный <i>Carbon activated</i>
Эффективность очистки воды от нефтепродуктов, % <i>Efficiency of water purification from oil products, %</i>	70%	88%	64%	90-98%
Стоимость, руб/т / <i>Cost, rbl / t</i>	от 2000 <i>from 2000</i>	от 1300 <i>from 1300</i>	от 1600 <i>from 1600</i>	от 120000 <i>from 120000</i>

материала. В свою очередь, характеристики структуры для насыпных сорбентов определяются сочетанием таких факторов: размер зерен (гранул); строение зерен (гранул) (шероховатая поверхность, гладкая поверхность); форма гранул; наличие примесей (глины, пыли); плотность зерен (метод гранулирования) и др. [7, 8].

Структура порового пространства СФМ оказывает решающее влияние на такие функциональные свойства пористых тел, как адсорбционная способность, диффузионная проницаемость, фильтрующие свойства [9].

Для выяснения основных параметров пористой структуры СВФ, которые оказывают определяющее влияние на его фильтрующие свойства, выполнены экспертные оценки [10]. Список ранжируемых факторов был составлен на основании изучения источников литературы и опроса экспертов. В него включены показатели, представленные в таблице 2.

Расчеты весовых коэффициентов перечисленных выше показателей, а также вычисление коэффициента Конкордами, характеризующего степень согласованности мнений экспертов, были произведены с применением программы Statistica 14.

Результаты и их обсуждение. По результатам выполненных расчетов коэффициент

оказался равен 0,560 ($W = 0,560$) для уровня значимости 0,05, то есть можно утверждать, что существует неслучайная согласованность в мнениях 5 специалистов.

Диаграмма расчетных весовых коэффициентов приведена на рисунке 1. Эта диаграмма дает представление о степени влияния различных характеристик на пропуск расхода воды через гранулированный сорбент.

Как следует из данных рисунка 1, распределение весовых коэффициентов является неравномерным, а падение степени влияния эффектов – медленным. В этом случае в физический эксперимент рекомендуется по возможности включать все факторы. Однако для решения задачи исследований в данном случае важными являются только параметры СФМ, определяющие их пористую структуру, причем они должны быть техническими характеристиками сорбирующих фильтрационных материалов для их изготовителей. Такими параметрами для СФМ из всех перечисленных в таблице 1 являются 3 показателя:

1. Размер гранул ($d_{гр}$, мм).
2. Насыпная плотность (масса единицы объема свободно лежащего слоя сорбента включая объем пор в собственно сорбенте и в промежутках между частицами сорбента) ρ (кг/м³) (г/дм³).
3. Прочность гранул сорбента σ 0,8 МПа.

Таблица 2. Список факторов, влияющих на их фильтрационные свойства гранулированных сорбентов

Table 2. List of factors affecting their filtration properties of granulated sorbents

№ показателей No. of indicators	Наименование показателя Name of the indicator
1	Размер гранул / Granule size
2	Удельная поверхность гранул сорбента / Specific surface area of sorbent granules
3	Форма гранул / Granule shape
4	Шероховатость поверхности гранул / Surface roughness of granules
5	Однородность гранул / Homogeneity of granules
6	Наличие примесей / Presence of impurities
7	Плотность гранул / Granule density
8	Пористость сорбента / Porosity of the sorbent
9	Водопоглощающая способность гранул / Water absorption capacity of granules
10	Насыпная плотность / Bulk density
11	Размеры пор / Pore sizes
12	Извилистость пор / Tortuosity of pores
13	Изотропность материала гранул / Isotropy of granule material
14	Поверхностная плотность материала гранул / Surface density of granule material
15	Коэффициент объемного сжатия гранул / Coefficient of volumetric compression of granules
16	Прочность гранул / Granule strength
17	Пористость гранул / Porosity of granules
18	Смачиваемость гранул / Wettability of granules
19	Размеры пор гранул / Granule pore sizes

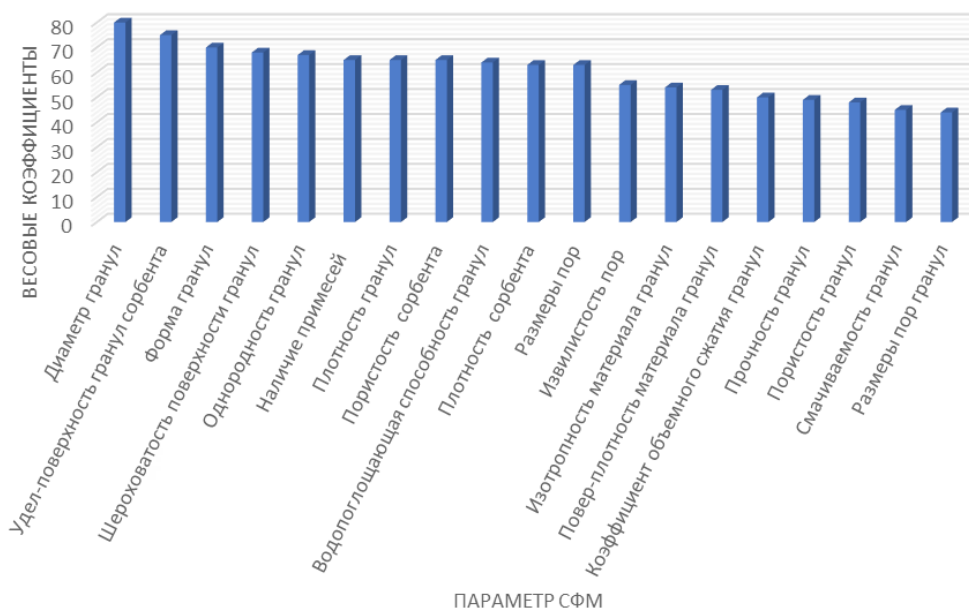


Рис. 1. Весовые коэффициенты

Fig. 1. Weight factors

Указанные факторы определяют такие свойства СФМ, как водопроницаемость в разных направлениях, пористость, распределение пор по радиусам, удельную поверхность, изменение поровой структуры под нагрузкой.

Часть показателей из списка определяется свойствами исходного сырья для изготовления СФМ и может альтернативно изменяться путем подбора специальной предварительной обработки гранул. Часть показателей определяется технологией изготовления гранул сорбента и может назначаться однозначно при выборе характера технологического процесса.

Для определения оптимального сочетания выбранных факторов использован метод планирования активного эксперимента. Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Целью эксперимента является выбор такого сочетания параметров насыпных СФМ, при котором система сорбентов будет пропускать наибольший расход при прочих равных условиях и будет устойчивой к температурам жаркого климата.

Для проведения эксперимента в данной серии опытов были взяты гранулированный сапропель марки НРК 6-2-1 – гранулированное GardenGro, который исследовался на фильтрацию чистой воды при разных температурах. Испытания проводились в фильтрационных приборах типа Дарси и Тима-Каменского по типовой методике для разных температур воды

в диапазоне от 20 до 40 °С с шагом 5 °С при слое сорбента в приборе 25 см.

Гранулированный сорбент укладывался на сеточку в приборе. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 2.

Для определения дисперсии опыта при дальнейшей оценке адекватности модели поставлены дополнительные опыты в центре плана (повторности основного уровня), а также для лучших и базовых вариантов опыта.

Опыты проводились при градиенте действующего напора $y = 3$ как допустимого с точки зрения предотвращения фильтрационных



Рис. 2. Схема загрузки и подключения фильтрационных приборов

Fig. 2. Scheme of loading and connection of filtration devices

деформаций сорбента. Длительность эксперимента определялась временем стабилизации насыпного сорбента и составляла 60 суток.

В процессе опыта проводились ежедневные замеры расхода воды из фильтрационных приборов, показаний пьезометров, температуры фильтрата, изменения высоты насыпного сорбента. Обработка результатов активного эксперимента с насыпными сорбентами производилась с применением программы Statistics 14.

При температуре 15°C коэффициент фильтрации был максимальным (34,16 м/сут.). С увеличением температуры до 20°C коэффициент фильтрации снижался до 28,25 м/сут. При дальнейшем увеличении температуры до 25°C коэффициент фильтрации продолжал снижаться до 25,02 м/сут. При 30°C наблюдается небольшое увеличение – до 27,26 м/сут. Однако при температуре 40°C коэффициент фильтрации снова снижался до 17,96 м/сут.

Коэффициент фильтрации сорбента в зависимости от температуры воды показывает тенденцию снижения с повышением температуры, за исключением небольшого повышения при 30°C. Это может указывать на оптимальную температуру для фильтрации, которая находится в диапазоне 25-30°C.

Достоверность аппроксимации подтверждена: линия тренда аппроксимирует процесс (рис. 3).

Для достоверности анализа в ANOVA выявлены следующие значения и допущения:

Нормальность. Зависимая переменная должна быть нормально распределена в каждой группе. Это можно проверить с помощью гистограмм, графиков нормальной вероятности или статистических тестов – таких, как тест Шапиро-Уилка.

Однородность дисперсии. Дисперсия зависимой переменной должна быть примерно одинаковой для всех групп. Это можно проверить с помощью таких статистических тестов, как тест Левена или тест Бартлетта.

Независимость. Наблюдения в каждой группе должны быть независимы друг от друга. Это означает, что значения в одной группе не должны быть связаны или зависеть от значений в любой другой группе.

Случайная выборка. Группы должны формироваться на основе случайной выборки, что гарантирует возможность обобщения результатов на всю популяцию.

Также для достоверности анализа был выбран уровень значимости, равный 0,05 (5%). Это означает, что различия между группами, имеющие вероятность меньше 5%, считаются статистически значимыми.

Для оценки сорбционной эффективности рассмотренного сорбента брались пробы воды и выполнялась качественная оценка снижения концентрации остатков нефтепродуктов. Сорбент показал достаточную эффективность по снижению концентрации нефтепродуктов в воде, которая составляла не менее 80%.

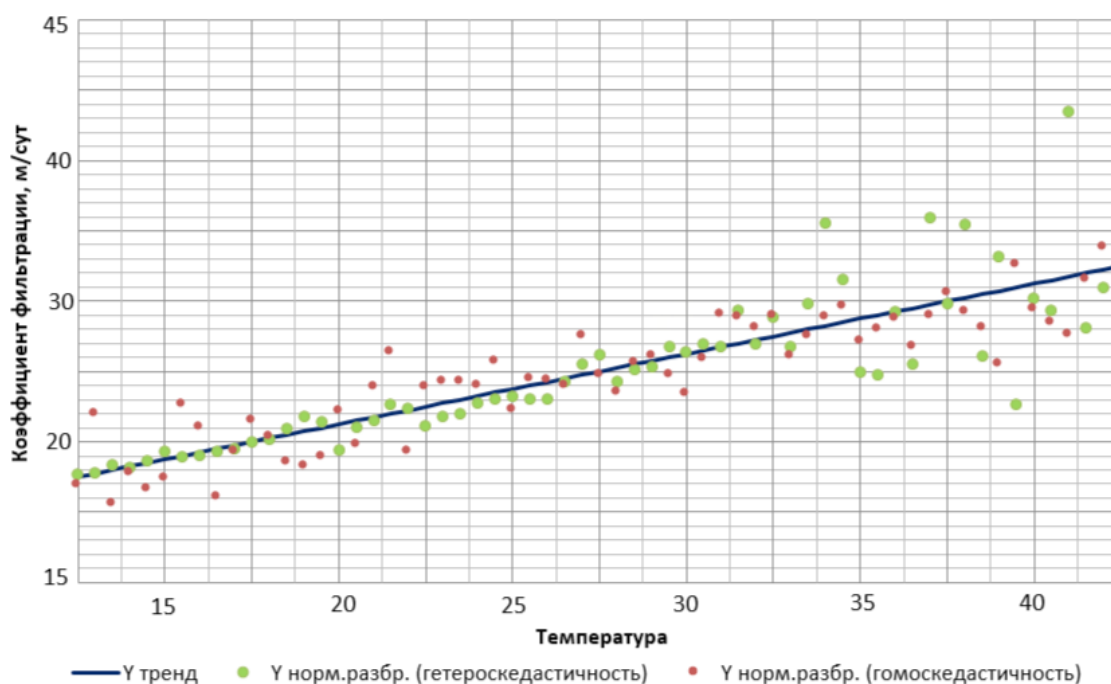


Рис. 3. Линейный тренд зависимости коэффициента фильтрации от температуры

Fig. 3. Linear trend of the temperature dependence of the filtration coefficient

Выводы

На основе экспертных оценок были выбраны параметры насыпных сорбентов, которые оказывают наибольшее влияние на их фильтрационные свойства и являются гарантированными производителями при выпуске сорбентов. Такими параметрами для сыпучих фильтрующих материалов являются 3 показателя: размер гранул ($d_{гр}$, мм); насыпная плотность (масса единицы объема свободно лежащего слоя сорбента включая объем пор в собственно сорбенте и в промежутках между частицами сорбента) ρ (кг/м³) (г/дм³); прочность гранул сорбента σ 0,8 Мпа.

На основе лабораторных испытаний были определены следующие фильтрационные характеристики гранулированного сорбента в зависимости от температуры воды: насыпной гранулированный сорбент на основе сапропеля в зависимости от температуры воды показывает

тенденцию снижения с повышением температуры, за исключением небольшого повышения при температуре 30°C. Это может указывать на оптимальную температуру для фильтрации, которая находится в диапазоне 25-30°C.

Максимальная величина расхода, соответствующая этим параметрам, равна 0,26 л/сут. для коэффициента фильтрации гранулированного сорбента 34,16 м/сут.

Указанные характеристики сыпучих фильтрующих материалов, предназначенных для сорбции загрязняющих веществ, формируют такую пористую его структуру, которая наилучшим образом фильтрует загрязненную жидкость в обозначенном диапазоне температур. Чтобы обосновать вышеприведенный вывод, детально изучаются структурные характеристики сорбентов и их фильтрационные свойства в различных температурно-временных диапазонах.

Список использованных источников

1. Глазунова И.В. Использование водных ресурсов в бассейне реки Барада / И.В. Глазунова, К. Хала, С.Н. Редников, С.А. Соколова // Природообустройство. 2024. № 1. С. 91-98. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-1-91-98. EDN: MQJTJY
2. Хаббал М. Экологические проблемы городов Сирии // Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов. сборник трудов конференции. Белгород: 2015. С. 120-124. EDN: VQVEDT
3. Syria conflict and its impact: a legal and environmental perspective / M. Qandeel, J. Sommer // Journal of International Humanitarian Legal Studies. 2022. Vol. 13, No. 2. Pp. 275-296.
4. Комплексный сорбент для очистки стоков от нефтепродуктов и тяжелых металлов / И.В. Глазунова, Н.П. Мартыненко // Агрохимический вестник. 2001. № 4. С. 38-39. EDN: GRPDJH
5. Кирейчева Л.В. Улучшение качества дренажных вод с помощью природных сорбентов / Л.В. Кирейчева, А.А. Купцова // Мелиорация и водное хозяйство. 1998. № 1. С. 6-8. EDN: OWWAKI
6. Саид М.А. Перспективы применения погружных вращающихся биофильтров для очистки сточных вод малых населенных пунктов в Сирии / Наука и инновации: Технические науки. Современные концепции: материалы конференции. Сборник научных статей, 20 декабря 2019 года. Уфа: Инфинити, 2019. С. 109-114. EDN: ODGLNA
7. Патент на изобретение RU2174439 C1, Сорбционно-фильтровальная загрузка для очистки воды и способ ее производства / Косов В.И., Баженова Э.В., Тверской государственный технический университет. 10.10.2001. Заявка № 2000116957/12 от 26.06.2000.
8. Лим Л.А. Нефтеемкость сорбента: проблема выбора методики определения / Л.А. Лим В.А. Реутов, А.А. Руденко, А.С. Чудовский // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 144-150.
9. Фетисова О.Ю. Синтез и свойства пористых углеродных материалов из природных графитов и антрацитов

References

1. Glazunova I.V. Use of water resources in the Barada River basin / I.V. Glazunova, K. Hala, S.N. Rednikov, S.A. Sokolova // Prirodoobustroystvo. – 2024. No. 1. P. 91-98. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-1-91-98. EDN: MQJTJY
2. Khabbal M. Environmental problems of Syrian cities / Ecology and rational environmental management of agro-industrial regions. Collection of conference proceedings. Belgorod: 2015. P. 120-124. EDN: VQVEDT
3. Syria conflict and its impact: a legal and environmental perspective / M. Qandeel, J. Sommer // Journal of International Humanitarian Legal Studies. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 275-296.
4. Complex sorbent for wastewater treatment from petroleum products and heavy metals / I.V. Glazunova, N.P. Martynenko // Agrochemical Bulletin, 2001, No. 4, P. 38-39. EDN: GRPDJH
5. Kireicheva L.V. Improvement of drainage water quality using natural sorbents / L.V. Kireicheva, A.A. Kuptsova // Land reclamation and water management. – 1998. No. 1. P. 6-8. EDN: OWWAKI
6. Sajid M.A. Prospects for the use of submersible rotating biofilters for the treatment of wastewater from small settlements in Syria / Said M.A. / Science and Innovation: Technical Sciences. Modern Concepts: Conference Proceedings. Moscow, December 20, 2019. P. 109-114.
7. Patent for invention RU2174439 C1, Sorption-filtration loading for water purification and its production method / Kosov V.I., Bazhenova E.V., Tver State Technical University. 10.10.2001. Application, No. 2000116957/12 dated 26.06.2000.
8. L.A. Lim Oil-retentivity of a sorbent: the problem of choosing a method for determination / L.A. Lim, V.A. Reutov, A.A. Rudenko, and A.S. Chudovsky // Advances in Modern Natural Sciences. LLC Publishing House Academy of Natural Sciences Moscow. 2018. No. 10. P. 144-150.
9. Fetisova O.Yu. Synthesis and Properties of Porous Carbon Materials from Natural Graphites and Anthracites / O.Yu. Fetisova: Dissertation of the Candidate of Chemical Sciences on the topic "Synthesis and Properties of Porous

/ О.Ю. Фетисова: Диссертация кандидата химических наук на тему «Синтез и свойства пористых углеродных материалов из природных графитов и антрацитов». Красноярск: 2012. 105 с.

10. Гаврилова Н.Н. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных / Н.Н. Гаврилова, В.В. Назаров. / Всерос. конф. Тезисы докладов: Химия твердого тела и функциональные материалы. / Институт химии твердого тела. Екатеринбург: 2015. Т. 2. С. 11-17.

Об авторах

Ирина Викторовна Глазунова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; ORCH ID 0000-0003-4931 2008, SCOPUS: 57500684900; ivglazunova@mail.ru

Кабтул Хала, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; halak93@gmail.com

Маргарита Александровна Ширяева, аспирант, младший научный сотрудник; SPIN-код: 4706-0330, AuthorID: 1081861; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; Shiryayeva.MA@fncg.ru

About the authors

Irina V. Glazunova, CSs (Tech), Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management; ORCH ID 0000-0003-4931 2008, SCOPUS: 57500684900; ivglazunova@mail.ru

Kabtul Khala, Postgraduate student of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management; halak93@gmail.com

Margaret A. Shiryayeva, post graduate student, Junior Researcher; SPIN code: 4706-0330, AuthorID: 1081861; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; Shiryayeva.MA@fncg.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Глазунова И.В., Кабтул Хала, Ширяева М.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 14.04.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 27.08.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 27.08.2025

Glazunova I.V., Kabtoul Hala, Shiryayeva M.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism