Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 48–57.
Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024. Vol. 67, no 1. P. 48–57.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья

УДК 66/544.032

DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-04

Исследование гидрофобизации насыпного зернистого материала на работу фильтра для морской воды

Александра Игоревна Крикун[1], Сергей Дмитриевич Руднев[2], Вероника Вячеславовна Феоктистова[3]

[1] Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

[2] Кемеровский государственный медицинский университет Минздрава России, Кемерово, Россия

[3] Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

[1] aleksa13@list.ru, http://orcid.org/0000-0002-9330-2555

[2] sdrudnev@yandex.ru,http://orcid.org/0000-0003-2506-6121

[3] feonika13@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-7680-2611

Аннотация. Проведены исследования влияния гидрофобизации при насыпном фильтровании морской воды в качестве перспективного способа повышения пропускной способности устройства. Актуальность исследования обоснована необходимостью повышения эффективности работы оборудования для очистки от механических примесей больших объёмов жидкости. Для достижения поставленной цели был произведен: 1) анализ, подбор и изучение научно-технических источников информации, нормативной и нормативно-технической документации в области исследования; 2) предварительная подготовка насыпных зернистых материалов (НЗМ) и обработка внутренней поверхности корпуса установки гидрофобизатором к экспериментальному изучению, а именно физическому моделированию процесса фильтрования морской воды через необработанные и гидрофобные НЗМ. Применялся условно безопасный для пищевой промышленности гидрофобизатор фирмы Admiral. В результате отмечается: повышение пропускной способности насыпных фильтров на 30–32 % при гидрофобизации НЗМ и внутренних стенок корпуса фильтра; снижение пропускной способности на 12 % при виброактивации и на 28–30 % при вибромеханоактивации морской воды.

Ключевые слова: насыпной фильтр, зернистый материал, морская вода, гидрофобизатор, механоактивация, пропускная способность

Для цитирования: Крикун А.И., Руднев С.Д., Феоктистова В.В. Исследование гидрофобизации насыпного зернистого материала на работу фильтра для морской воды // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 48–57.

© Крикун А.И., Руднев С.Д., Феоктистова В.В., 2024

FOOD SYSTEMS

Original article

DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-04

Study of hydrophobization of bulk granular material on the operation of a seawater filter

Aleksandra I. Krikun[1], Sergey D. Rudnev[2], Veronika V. Feoktistova[3]

[1] Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

[2] Kemerovo State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kemerovo, Russia

[3] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

[1] aleksa13@list.ru, http://orcid.org/0000-0002-9330-2555

[2] sdrudnev@yandex.ru,http://orcid.org/0000-0003-2506-6121

[3] feonika13@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-7680-2611

Abstract. Research has been carried out on the influence of hydrophobization during bulk filtration of seawater as a promising way to increase the throughput of the device. The relevance of the study is justified by the need to increase the efficiency of equipment for purifying large volumes of liquid from mechanical impurities. To achieve this goal, the following was carried out: 1) analysis, selection and study of scientific and technical sources of information, regulatory and technical documentation in the field of research; 2) preliminary preparation of bulk granular materials (BGM) and treatment of the inner surface of the installation body with a hydrophobizing agent for experimental study, namely physical modeling of the process of filtering sea water through untreated and hydrophobic BGM. A water repellent from Admiral, which is conditionally safe for the food industry, was used. As a result, the following is noted: an increase in the throughput of bulk filters by 30–32 % with hydrophobization of the BGM and the internal walls of the filter housing; reduction in throughput by 12 % with vibration activation and by 28–30 % with vibration-mechanical activation of sea water.

Keywords: bulk filter, granular material, sea water, hydrophobizing agent, mechanical activation, throughput

For citation: Krikun A.I., Rudnev S.D., Feoktistova V.V. Study of hydrophobization of bulk granular material on the operation of a seawater filter. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2024; 67(1):48–57. (in Russ.).

Введение

Из теории смачивания [1, 2] известно, что для прохождения жидкости через слабо смачиваемые узкие каналы пористых тел требуется меньше энергии относительно просачивания через хорошо смачиваемые [1, с. 50]. Явление смачивания, приводящее к формированию краевого угла между жидкостью и твердой подложкой, лежит в основе механизмов, определяющих равновесие и кинетику влаги в пористых телах. Величина равновесного краевого угла (угла контакта) определяется полем поверхностных сил и энергией взаимодействия жидкости с твердой подложкой. Слабое взаимодействие ведет к несмачиванию, сильное – приводит к растеканию жидкости по поверхности, её полному смачиванию [1, с. 210]. Степень смачивания жидкостью можно регулировать путём обработки поверхности и придания

ей гидрофобных свойств. В определенных видах деятельности это благоприятно сказывается на производительности технологических процессов.

В связи с этим обработка поверхности гидрофобным покрытием (гидрофобизатором) способствует снижению смачиваемости жидкостью, однако при этом сохраняется паро- и газопроницаемость. Гидрофобизаторы не являются водоотталкивающими покрытиями, поскольку молекулы воды слабо притягиваются, а не отталкиваются от них. С целью получения твердой поверхности гидрофобных свойств в виде мономолекулярного слоя (толщиной в одну молекулу) материал обрабатывают растворами, эмульсиями или парами гидрофобизаторов – веществ, которые слабо взаимодействуют с водой, но прочно удерживаются на поверхности материала. В качестве гидрофобизаторов используются такие вещества, как соли жирных кислот, катионоактивные, поверхностно-активные вещества (ПАВ), а также низко- и высокомолекулярные кремнийорганические, фторорганические соединения [3].

Как известно, широкое распространение процесса фильтрования через разделительные зернистые перегородки можно объяснить универсальностью и применимостью для многих областей пищевой промышленности. Нарастающий интерес к развитию данной области приводит исследователей к поиску новых направлений, целью которых является повышение эффективности процесса фильтрования за счет увеличения пропускной способности фильтров, обеспечения качества фильтрата, сокращение затрат (энергетических, временных) и пр.

Несмотря на то, что коллектив авторов определил вектор своей деятельности в направлении совершенствования фильтровального оборудования в области предварительной механоактивации водных растворов [4, 5 и др.], необходимо учитывать не только положительные факторы применения механоактивации, а также отрицательные, именно к таким относится то, что применение механоактивации влияет на расход электроэнергии. В связи с этим определение опытным путём целесообразности применения гидрофобного зернистого материала в процессе фильтрования представляет интерес исследования.

Анализ работ, посвященных теме гидрофобизации и водоотталкивания: Воронкова М. Г., Шорохова Н. В. [6], Сураева В. Б. [7], Стасенко Ю. М. [8], показал, что данная тема нашла свое развитие в строительной области при обработке каменных, цементных материалов, древесины в качестве протектора от влаги. Поскольку исследований, связанных с рассматриваемой темой в пищевой промышленности не обнаружено, целью данной работы является исследование влияния гидрофобных зернистых материалов на процесс фильтрования морской воды, в том числе определение закономерностей изменения пропускной способности.

Цель работы: исследовать влияние гидрофобизации насыпных зернистых сред на эффективность работы фильтра морской воды.

Так, в процессе фильтрования необходимо учесть поверхности, которые вступают в адгезионное взаимодействие при контакте с жидкостью. Сюда относятся стенки фильтровальной камеры, зернистые материалы. На сегодняшний день доступно множество средств, позволяющих уменьшить смачиваемость поверхности, например, использовать гидрофобизатор, водоотталкивающую пропитку и обработать нужную поверхность или заведомо выбрать более гидрофобный материал. Изучение этого вопроса составило следующий этап исследования.

Материалы и методы исследований

В основу исследования гидрофобных свойств зернистых материалов и определения наиболее подходящего материала для обработки гидрофобизатором взяты результаты работы [9], представленные в табл. 1. Приведены сведения о насыпных зернистых материалах (НЗМ) естественного и искусственного происхождения, а также показатели, которые позволяют рассмотреть их гидрофобные свойства. В результате анализа табл. 1 для экспериментальной части работы были отобраны материалы естественного происхождения, такие как морской песок и гравий. Выбор обусловлен тем, что у большинства береговых рыбоперерабатываю-

щих предприятий морского типа в Приморском крае эти материалы находятся в свободном для эксплуатации доступе как в физическом, так и денежном эквиваленте, наряду с этим стабильны к воздействию морской воды как агрессивной среды, обладают высоким коэффициентом фильтрации, пористостью, имеют низкое содержание глинистых и каменных включений, не дают примесей.

Таблица 1

Свойства насыпных зернистых материалов (НЗМ), влияющие на гидрофобность

Table 1

Properties of bulk granular materials (BGM**) affecting hydrophobicity**

№ п/п	Название материала	Показатели					
		Средний размер, мм	Когезия	Адгезия	Пористость п, %	Плотность ρ, кг/м^3	Безопасность для пищевой промышленности
		Дисперсные материалы естественного происхождения					
1	Морской песок	От 1,5 до 2,0	–	+	95÷98	1300÷ 1500	+
2	Морской песок с пропиткой	От 1,5 до 2,0	+	–	*	*	+**
3	Морской гравий	От 5 до 10	–	+	45	1750	+
4	Морской гравий с пропиткой	От 5 до 10	+	–	*	*	+**
5	Цеолиты-клиноптилолит	От 0,7 до 1,5	+	+	38÷46	1100	+
6	Гидрофобный песок	От 1 до 2,0	–	+	*	*	+**
		Дисперсные материалы искусственного происхождения					
6	Биошары	От 3,0 до 3,2	+	–	*	970	+
7	Керамзит гравий	От 1 до 3	–	+	40÷60	2000÷3000	+
8	Пластиковая загрузка в пищевом парафине	От 3,0 до 3,2	+	–	*	*	+
9	Биокерамика	От 5 до 12	+	–	*	*	+

Примечание. * – на этом этапе исследование данных параметров не проводилось; ** – условно безопасные. Для использования в пищевой промышленности гидрофобизаторы должны соответствовать требованиям безопасности и гигиены, установленным соответствующими регулирующими органами.

Заранее подготовленные навески морского песка и морского гравия обрабатывали гидрофобизатором фирмы Admiral. В соответствии с инструкцией гидрофобизатор наносился на предварительно промытый, высушенный и очищенный от пыли НЗМ. Для обработки навесок морского песка весом 300 г (средний размер фракций 0,2 мм) и морского гравия весом 300 г (средний размер фракций 4 мм) в 1 слой потребовалось 74 мл гидрофобизатора (из расчета 167 мл на 1 м^2). Средство наносилось на НЗМ с помощью пульверизатора. Время до полного высыхания при температуре (t=20 °С) и относительной влажности 63 % составило 180 мин.

На рис. 1 продемонстрирован морской песок, обработанный гидрофобизатором.

Рис. 1. Обработанный гидрофобизатором морской песок
Fig. 1. Sea sand treated with a hydrophobizing agent

На этапе физического моделирования фильтрование через необработанные НЗМ осуществлялось без обработки внутренних стенок фильтра гидрофобизатором. При фильтровании через гидрофобные НЗМ – с обработкой. Для обработки с помощью кисти внутренних стенок фильтра в 1 слой потребовалось 39 мл гидрофобизатора. Время до полного высыхания при температуре 20 °С и относительной влажности 63 % составило 90 мин.

Температура воздуха в лаборатории (t, °С) и относительная влажность (φ, %) определялись по известным методикам [10–12]. Измерение t и φ осуществлялось при помощи датчика температуры и влажности SHT30 (точность: 0,015 °С, 0,01 %).

В качестве водного раствора для фильтрования использовали морскую воду, отбор проб происходил в соответствии с действующими методиками [13–15] в акватории о. Русский.

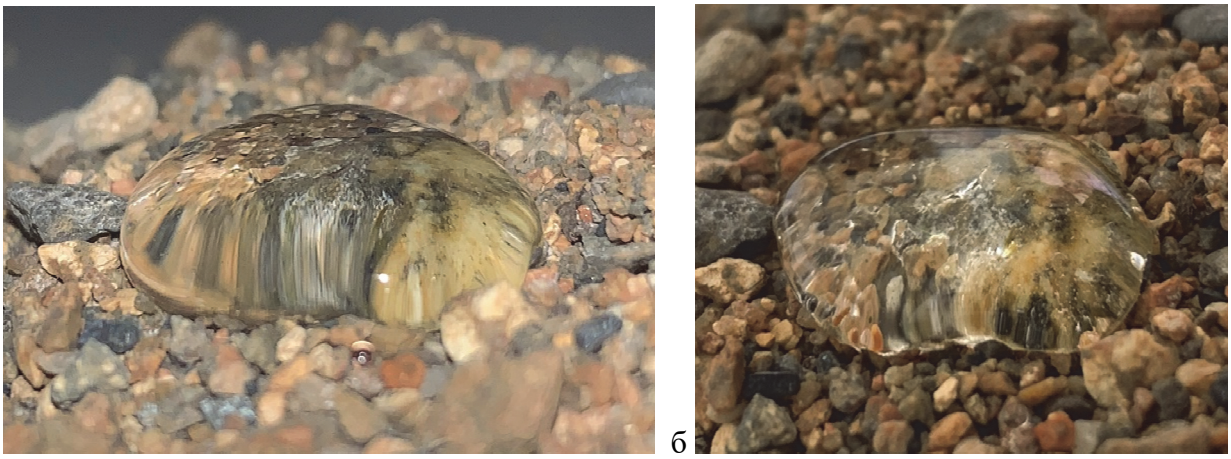
Перед началом процесса фильтрования с помощью анализатора качества воды W3988 (точностью до 0,01) определялись исходные параметры водного раствора: температура ($t_в$=19,1 ºС); соленость (S=35 ‰); плотностью (ρ = 1003,68 кг/м^3); водородный показатель (pH =7,83); общее количество растворенных твердых веществ (TDS =17,8 ppm). Измерение S и ρ также осуществляли с помощью оптического рефрактометра Brix&Salinity (точностью 0,1).

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальной работы произвели фотофиксацию капли морской воды на разных поверхностях (рис. 2, 3).

Рис. 2. Капля морской воды на поверхности из пластика
Fig. 2. A drop of seawater on a plastic surface

Капля морской воды имеет типичный вид для капли, находящейся на поверхности, отталкивающей воду, не растекается, имеет хорошо выраженные границы.



а б

Рис. 3. Капля морской воды на поверхности из гидрофобных НЗМ:
а – со вспышкой; б – без вспышки
Fig. 3. A drop of sea water on a surface made of hydrophobic BGM:
a – with flash; б – without flash

Капля (рис. 3) имеет более выраженный, чем на рис. 2, вид, морская вода формируется на поверхности и стремится объединиться с другими молекулами воды (если продолжить добавлять воду).

В процессе фильтрования морской воды получили следующие данные, показанные на рис. 4 и представленные в табл. 2. Включили в диаграмму (рис. 4) результаты исследования пропускной способности фильтров с предварительной вибро- и вибромеханоактивацией морской воды с целью установления, какой из способов позволяет повысить пропускную способность наиболее эффективнее, способны ли совместная гидрофобизация и механоактивация увеличивать пропускную способность.

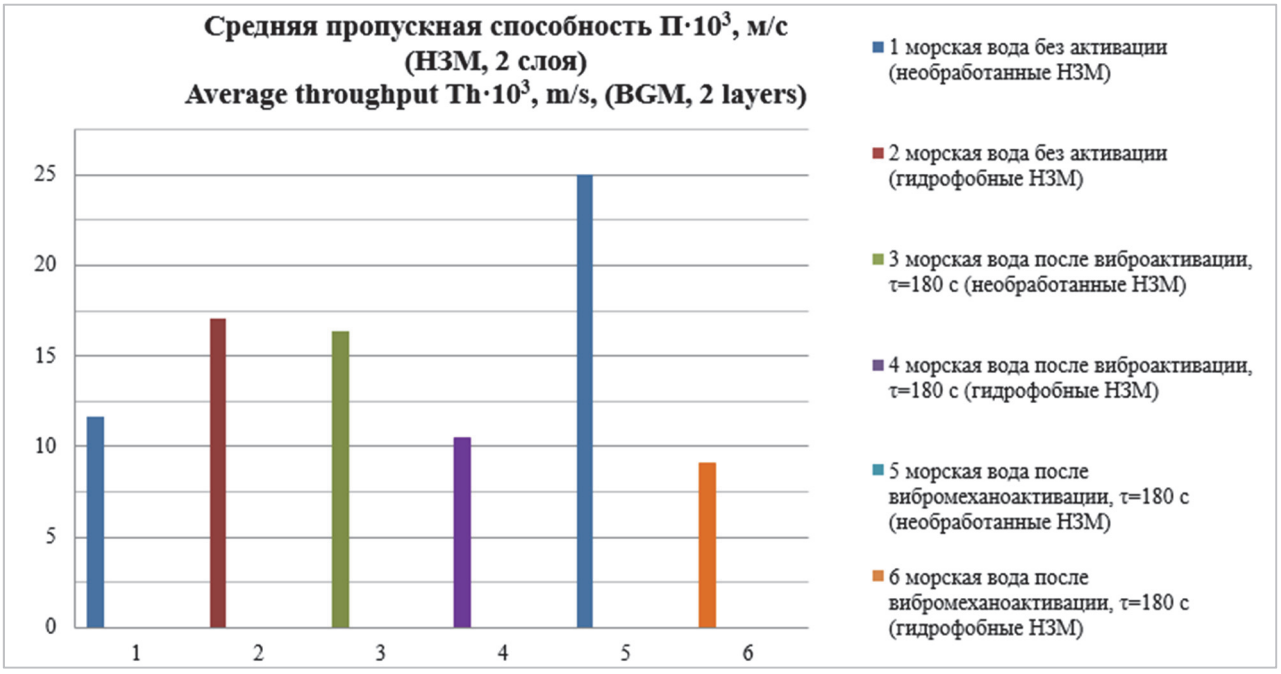


Рис. 4. Средняя пропускная способность фильтра с необработанными и гидрофобными НЗМ
Fig. 4. Average throughput of filter with untreated and hydrophobic BGM

Таблица 2

Результаты исследования пропускной способности через необработанные и гидрофобные НЗМ

Table 2

Results of the study of throughput through untreated and hydrophobic BGM

Установленное условие*	Сравнение средней пропускной способности фильтров с базовой конструкцией	
	на %	в количество раз
П1 < П2	31,89	1,47
П1 < П3	28,85	1,41
П1 > П4	11,49	1,11
П1 < П5	53,51	2,15
П1 > П6	28,34	1,28
П2 > П3	4,46	1,11
П2 > П4	11,49	1,64
П2 < П5	31,75	1,47
П2 > П6	88,42	1,88
П3 > П4	56,70	1,57
П5 > П6	176,07	2,76

Примечание. * П – средняя пропускная способность фильтра (при одних и тех же условиях): П1, П3, П5– с необработанными НЗМ (при фильтровании не активированной, вибро- и вибромеханоактивированной морской воды соответственно); П2, П4, П6 – с гидрофобными НЗМ (при фильтровании не активированной, вибро- и вибромеханоактивированной морской воды соответственно).

Анализ диаграммы (рис. 4) и данных (табл. 2) позволили установить:

- гидрофобизация НЗМ и внутренних стенок корпуса фильтра перед фильтрованием не активированной морской воды позволяет повысить пропускную способность на 32 %; в то же время при тех же условиях пропускная способность снижается на 12 % – в случае фильтрования виброактивированной морской воды и на 30 % – механоактивированной морской воды. Это может быть связано с несовместимостью приобретенных от гидрофобизатора свойств НЗМ и активированного состояния морской воды, из-за механического воздействия происходит насыщение морской воды кислородом (в случае вибромеханоактивации образуется пена) в результате чего происходит закупоривание каналов, и активированная морская вода скапливается в резервуаре над гидрофобным НЗМ. Более подробно вопросы совместного использования в процессе фильтрования предварительной вибро- и вибромеханоактивации морской воды и обработка гидрофобизатором зернистых материалов рассматривались в работе [16];

- предварительная вибро- или вибромеханоактивация морской воды перед фильтрованием через необработанные НЗМ способствуют повышению пропускной способности фильтров: виброактивация (на 40,55 %); вибромеханоактивация (на 115,12 %).

Таким образом, на данном этапе механоактивация (без предварительной гидрофобизации поверхностей) является наиболее оправданным способом увеличения пропускной способности в процессе фильтрования морской воды, несмотря на энергозатраты, поскольку не оказывает негативного влияния на фильтрат (приводя его во временное тиксотропное состоя-

ние), при этом ускоряя производительность процесса. Целесообразность совместного применения гидрофобизации и механоактивации не установлена, но может быть применена раздельно в каскадном фильтровании больших объёмов воды после её технологического применения, например, в водоочистке при гидродобыче полезных ископаемых.

Заключение

Гидрофобизация насыпных зернистых материалов (НЗМ) и внутренних стенок корпуса фильтра является перспективной темой для исследования в рамках процесса фильтрования, поскольку увеличивает пропускную способность фильтра в 1,5 раза (на 32 %) без дополнительных энергозатрат.

Дальнейшее исследование будет осуществляться в несколько этапов, поскольку данные вопросы остались не изучены до конца: 1) детальный подбор и анализ гидрофобизаторов по следующим критериям: безопасность для пищевой промышленности; доступность; стоимость и др.; 2) исследование длительности сохранения рабочих свойств обработанного НЗМ и стенок корпуса фильтра, силы водооталкивания и глубины пропитки.

Список источников

1. Дерягин, Б.В. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. М.: Химия, 1989. 288 с.

2. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. М.: Химия, 1976. 232 с.

3. Гетьман Л.П. Экспериментальная оценка эффективности гидрофобизации каменных материалов: маг. дисс.: 08.04.01 / Гетьман Лилия Павловна. Тольятти, 2017. 110 с.

4. Руднев, С.Д. Фильтрование механоактивированной морской воды / С.Д. Руднев, А.И. Крикун, В.В. Феоктистова, М.В. Суменков // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84, № 3. С. 17–24. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-17-24.

5. Rudnev S.D. Study of the effect of mechanical activation on the suspension filtration process / S.D. Rudnev, A.I. Krikun, V.V. Feoktistova, M.O. Kustovinova // AIP Conference Proceedings: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. Sevastopol: American Institute of Physics Inc., 2022. P. 050039. doi: 10.1063/5.0100103. EDN DRHWAK.

6. Воронков, М.Г. Водоотталкивающие покрытия в строительстве / М.Г. Воронков, Н.В. Шорохов. Рига: Изд-во АН СССР, 1963. 190 с.

7. Сураев В.Б. Гидрофобизация: теория и практика. Часть 1 // Технологии строительства. 2002. № 1. С. 120–121.

8. Стасенко Ю.М. Эффективная защита капиллярно-пористых строительных материалов от водопроницаемости, климатических и технологических форм коррозии // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2002. № 2. С. 32–33.

9. Крикун А.И. Исследование зернистых материалов при водоподготовке // Научные труды Дальрыбвтуза. 2017. № 43. С. 89–94.

10. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. М.: Стандартинформ, 2018. 34 с.

11. ГОСТ 8.010-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014, 2019. 18 с.

12. ГОСТ 28498-90. Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.

13. ГОСТ 17.1.3.08-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества морских вод. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 6 с.

14. ГОСТ 17.1.5.04-81. Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 7 с.

15. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2020. 31 с.

16. Крикун, А.И. Исследование современных аспектов фильтрования морской воды / А.И. Крикун, С.Д. Руднев, В.В. Феоктистова // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2022. С. 387–392. EDN TXQWHQ.

References

1. Deryagin, B.V. Water in dispersed systems / B.V. Deryagin, N.V. Churaev, F.D. Ovcharenko, etc. M.: Khimiya, 1989. 288 p.

2. Summa, B.D. Physico-chemical bases of wetting and spreading / B.D. Summa, Yu.V. Goryunov. M.: Chemistry, 1976. 232 p.

3. Getman L.P. Experimental evaluation of the effectiveness of hydrophobization of stone materials: mag. diss.: 08.04.01 / Getman Lilia Pavlovna. Tolyatti, 2017. 110 p.

4. Rudnev, S.D. Filtration of mechanoactivated seawater / S.D. Rudnev, A.I. Krikun, V.V. Feoktistova, M.V. Sumenkov // Vestnik VGUIT. 2022. Vol. 84, No. 3. pp. 17–24. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-17-24.

5. Rudnev, S.D. Study of the effect of mechanical activation on the suspension filtration process / S.D. Rudnev, A.I. Krikun, V.V. Feoktistova, M.O. Kustovinova // AIP Conference Proceedings: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. Sevastopol: American Institute of Physics Inc., 2022. P. 050039. doi: 10.1063/5.0100103. EDN DRHWAK.

6. Voronkov, M. G. Water-repellent coatings in construction / M.G. Voronkov, N.V. Shorokhov. Riga: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 190 p.

7. Suraev V.B. Hydrophobization theory and practice. Part 1 // Construction technologies. 2002. No. 1. pp. 120–121.

8. Stasenko Yu.M. Effective protection of capillary-porous building materials from water permeability, climatic and technological forms of corrosion // Building materials, equipment and technologies of the XXI century. 2002. No. 2. pp. 32–33.

9. Krikun A.I. Investigation of granular materials in water treatment // Scientific works of Dalrybvtuz. 2017. No. 43. pp. 89–94.

10. GOST 8.417-2002. The State System for ensuring the uniformity of Measurements (GSI). Units of quantities. M.: Standartinform, 2018. 34 p.

11. GOST 8.010-2013. The State System for ensuring the uniformity of Measurements (GSI). Measurement techniques. The main provisions. M.: Standartinform, 2014, 2019. 18 p.

12. GOST 28498-90. Liquid glass thermometers. General technical requirements. Test methods. M.: Standartinform, 2007. 11 p.

13. GOST 17.1.3.08-82. Nature conservation. The hydrosphere. Rules for quality control of marine waters. M.: IPK Publishing House of Standards, 2001. 6 p.

14. GOST 17.1.5.04-81. Nature conservation. The hydrosphere. Devices and devices for sampling, primary processing and storage of natural water samples. general technical conditions. M.: IPK Publishing House of Standards, 2003. 7 p.

15. GOST R 59024-2020. Water. General requirements for sampling. M.: Standartinform, 2020. 31 p.

16. Krikun, A. I. Investigation of modern aspects of seawater filtration / A.I. Krikun, S.D. Rudnev, V.V. Feoktistova // Actual problems of the development of biological resources of the World Ocean. Vladivostok: Far Eastern State Technical Fisheries University, 2022. pp. 387–392. EDN TXQWHQ.

Информация об авторах

А.И. Крикун – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования, SPIN-код: 6217-9103, AuthorID: 946577;

С.Д. Руднев – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры медицинской, биологической физики и высшей математики, SPIN-код: 6389-7238, AuthorID: 423406;

В.В. Феоктистова – аспирант, SPIN-код: 4146-3970, AuthorID: 998024.

Information about the authors

A.I. Krikun – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, SPIN-code: 6217-9103, AuthorID: 946577;

S.D. Rudnev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Medical, Biological Physics and Higher Mathematics, SPIN-code: 6389-7238, AuthorID: 423406;

V.V. Feoktistova – Postgraduate student, SPIN-code: 4146-3970, AuthorID: 998024.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 18.03.2024.

The article was submitted 06.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 18.03.2024.