

Использование метода нанофильтрации для очистки фугата установок обезвоживания осадков станций водоподготовки

Д.В. Спицов  , А.Г. Первов , Тет Зо Аунг 

 SpitsovDV@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние годы возрос интерес к нанофильтрации как к методу подготовки питьевой воды из поверхностных водоисточников за счет высокой эффективности удержания мембранами органических веществ. Представлено исследование возможности применения мембранных технологий для очистки фугата и утилизации концентрата мембранной установки. **Методы.** Проведены эксперименты по очистке фугата (иловой воды) после обезвоживания осадка на станции водоподготовки с применением обратноосмотических и нанофильтрационных мембран. Очищенная с применением мембран вода (пермеат) смешивалась с питьевой водой, а концентрат, содержащий все задержанные мембранами загрязнения, возвращался в отстойник-уплотнитель осадка. Соотношение расходов пермеата и концентрата в установке обратного осмоса подбиралось на основе расчета материального баланса так, чтобы количество загрязнений в воде осадка после осадкоуплотнителя равнялось количеству загрязнений, содержащихся в обезвоженном осадке. **Результаты.** Показано, что применение мембранной установки позволяет получить очищенную воду и обеспечить эффективное снижение таких показателей, как ХПК, концентрация алюминия, окисляемость до норм ниже требований к питьевой воде. Представлены экспериментальные кривые, позволяющие проводить подбор мембран на каждой ступени и прогнозировать состав очищенной воды. По результатам обработки экспериментальных данных разработана балансовая схема процесса обезвоживания осадка с очисткой фугата на мембранной установке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоподготовка, метод нанофильтрации, фугат, установка обезвоживания, мембранная установка.

Для цитирования: Спицов Д.В., Первов А.Г., Тет Зо Аунг Использование метода нанофильтрации для очистки фугата установок обезвоживания осадков станций водоподготовки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 82–94. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_7.

Дата поступления 07.11.2022.

APPLICATION OF THE NANOFILTRATION METHOD FOR FUGAT PURIFICATION OF THE SLUDGE DEWATERING UNITS OF THE WATER TREATMENT STATIONS

Dmitriy V. Spitsov  , Aleksey G. Pervov , Htet Zo Aung 

 SpitsovDV@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. Recently, an interest to nanofiltration as a method of surface sources originated drinking water treatment increased significantly due to the high effectiveness of organic substances retention by diaphragms. The article presents a study of possibility to use diaphragm techniques for the fugat (silt water) treatment and the diaphragm plant concentrate utilization. **Methods.** We have conducted experiments on the fugat (silt water) purification after dewatering of the sludge at the water treatment station with the use of reverse osmosis and nanofiltration diaphragms. The water treated with diaphragms (permeate) was mixed with drinking water while the concentrate containing all pollutants retained by the diaphragms was returned back to the settling tank. Proportion of flows of permeate and concentrate in the reverse osmosis plant was selected on the basis of material balance in such a way that the amount of pollutants in the sludge water after sludge concentrator equaled the amount of pollutants present in the dewatered sludge. **Results.** We have demonstrated that application of the diaphragm plant enables to obtain purified water and provide effective decrease of such indicators as COD, aluminum concentration, and oxidation below normative requirements to drinking water. We present experimental curves that enable to select diaphragms at every stage and predict the treated water chemical composition. In accordance with the experimental data processing, we have developed a balance scheme of the process of dewatering of the sludge with the fugat purification at the diaphragm plant.

Key words: water treatment, nanofiltration method, fugat, dewatering plant, diaphragm unit.

For citation: Spitsov D.V., Pervov A.G., Htet Zo Aung. Application of the nanofiltration method for fugat purification of the sludge dewatering units of the water treatment stations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 82–94. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_7.

Received 07.11.2022.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на станциях подготовки питьевой воды активно ведутся работы по применению современных методов обезвоживания осадков, образующихся в результате коагуляции загрязнений и их отстаивания [1]. Для обезвоживания осадков и доведения их показателей влажности до значений 75–80 % используются различные виды оборудования – центрифуги и фильтр-прессы. Однако, как показывает опыт внедрения технологий обезвоживания осадков [1], фугаты все равно продолжают сбрасываться в городскую канализацию. Это связано со сложностью очистки воды, содержащей до 180 мг/л взвешенных веществ, с цветностью 30–210 градусов ПКШ, при этом значение содержания алюминия может достигать до 63 мг/л, а перманганатной окисляемости – до 32 мг/л. Кроме того, фугат содержит токсические вещества – мышьяк, никель, ртуть, свинец, что затрудняет возможность его эффективной очистки традиционными методами коагуляции и флокуляции и возврата в исходную воду [1].

В статье представлен новый подход к очистке фугата станций обезвоживания осадка, основанный на применении мембранного метода обратного

осмоса с получением очищенной воды и концентрата, который утилизируется вместе с обезвоженным осадком. Утилизация концентрата достигается с помощью многократного концентрирования фугата в установке обратного осмоса, смешивания концентрата с влажным осадком и последующим обезвоживанием этой смеси. Необходимые для расчета системы обратного осмоса значения параметров ее работы определяются, исходя из соображений массового баланса: количество растворенных загрязнений, удаляемых вместе с осадком, равно количеству растворенных загрязнений, поступающему в осадкоуплотнитель вместе с влажным осадком.

Применение мембранных технологий обратного осмоса для очистки природных и сточных вод ведется на протяжении 40 лет [2]. В последние годы возрос интерес к нанофильтрации как к методу подготовки питьевой воды из поверхностных водоисточников [3–6], благодаря высокой эффективности задержания мембранами органических веществ, образующих цветность воды [7, 8].

Цель работы – исследование возможности применения мембранных технологий для очистки фугата и утилизации концентрата мембранной установки.

За счет «универсальности» мембран в задержании органических веществ различной природы и молекулярного веса (119,38 г/моль для хлороформа, 221 г/моль для пестицидов, 1500–600 000 г/моль для гуминовых и фульвокислот), обратноосмотические и нанофильтрационные мембраны широко применяются в процессах доочистки бытовых сточных вод для целей их повторного использования [2–8]. С учетом различной селективности мембран (эффективности задержания) по одновалентным и многовалентным ионам, а также органических веществ, в процессах очистки производственных сточных вод используется разделение растворов и выделение различных компонентов [7–23]. Благодаря разработке нанофильтрационных мембран стало возможным глубокое многократное концентрирование минерализованных стоков установок ионного обмена и обратного осмоса для их дальнейшей утилизации [19–21]. В частности, в литературных источниках представлено много информации по применению нанофильтрации для очистки фугатов после обезвоживания минерализованных осадков природных и сточных вод [9–20].

Авторами данной статьи уже проводились исследования по применению технологий обратного осмоса и нанофильтрации не только для очистки фугатов (иловых вод), обезвоживания осадков сточных вод и очистки фильтратов полигонов ТБО [24], но и для утилизации концентратов мембранных установок и удаления всех задержанных мембранами загрязнений вместе с обезвоженным осадком [25, 26].

Разработка новой технологии направлена на создание оборотной системы очистки и утилизации фугатов установок обезвоживания осадков на водопроводных станциях, что позволит исключить их сброс в городскую канализацию. Поскольку обработка фугата методом обратного осмоса предполагает многократное концентрирование фугата и одновременную эффективную очистку его от ионов солей и растворенных органических соедине-

ний, технологическая схема обработки фугата использует три различных ступени мембранных аппаратов (рис. 1).

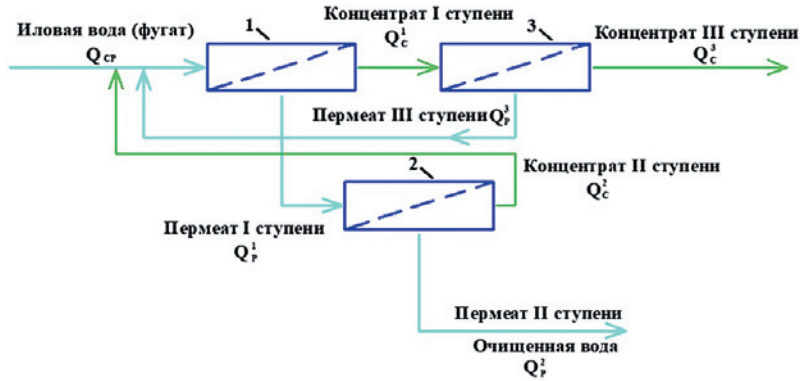


Рис. 1. Схема подключения мембранных аппаратов и направления основных потоков пермеатов и концентратов: 1 – мембранный аппарат с нанофильтрационными мембранами 1 ступени; 2 – мембранный аппарат с обратноосмотическими мембранами 2 ступени; 3 – мембранный аппарат-концентратор 3 ступени с нанофильтрационными мембранами.

Fig. 1. Block diagram the diaphragm plants' connection and the main flows of permeates and concentrates directions: 1 is a diaphragm plant with the 1st stage nanofiltration diaphragms; 2 is a diaphragm plant with the 2nd stage reverse osmosis diaphragms; 3 is a 3rd stage concentrating diaphragm plant with nanofiltration diaphragms.

Установка на основе мембран обратного осмоса и нанофильтрации (рис. 2) для очистки фугата после обезвоживания осадка на центрифуге работает по двухступенчатой схеме [24, 25]. На рис. 1 показана схема подключения мембранных аппаратов и направления основных потоков пермеатов и концентратов. Каскадное подключение нанофильтрационных аппаратов на первой ступени позволяет добиться высоких значений кратности концентрирования K мембранной установкой и минимального значения расхода концентрата [26]. Применение мембранных аппаратов обратного осмоса на второй ступени очистки сокращает концентрацию органических веществ в обрабатываемой воде и повышает производительность по очищенной воде [24].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель экспериментов – исследование очистки фугата и получение чистой воды и концентрата, содержащего все удаленные загрязнения.

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. Объемы воды (фугата и пермеата) составляли по 20 л. Исходная вода помещалась в бак исходной воды 1, откуда насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3, в котором разделялась на пермеат (очищенную воду) и концентрат. Концентрат возвращался в бак 1, а пермеат направлялся в бак 4. Использовался роторный насос Procon (180–200 л в час при давлении 16 Бар). Эксперименты проводили с применением серийных мембранных элементов стандарта 1812 модели производства корейской компании CSM с обратноосмотическими мембранами модели BLN

(значением селективности по солям 95–96 %) и нанофильтрационными элементами модели с мембранами типа 70 NE селективностью 70 %. Площадь мембран в мембранном аппарате стандарта 1812 (диаметр 1,8 дюйма, длина 12 дюймов) составляла 0,5 м². По мере накопления пермеата в баке 4 объем исходной воды в баке 1 уменьшался, при этом концентрации загрязнений – растворенных солей и органических веществ, обобщенно оцениваемые показателем ХПК, – повышались, а производительность мембранного аппарата по очищенной воде снижалась. Эксперименты позволили определить эффективность задержания мембранами различных загрязнений и производительность мембран для разработки установки, в частности, для одновалентных ионов (хлориды, бикарбонаты, аммоний) селективность составила 65–75 %, а для многовалентных ионов (кальций, сульфаты, алюминий) – 90 % и выше.

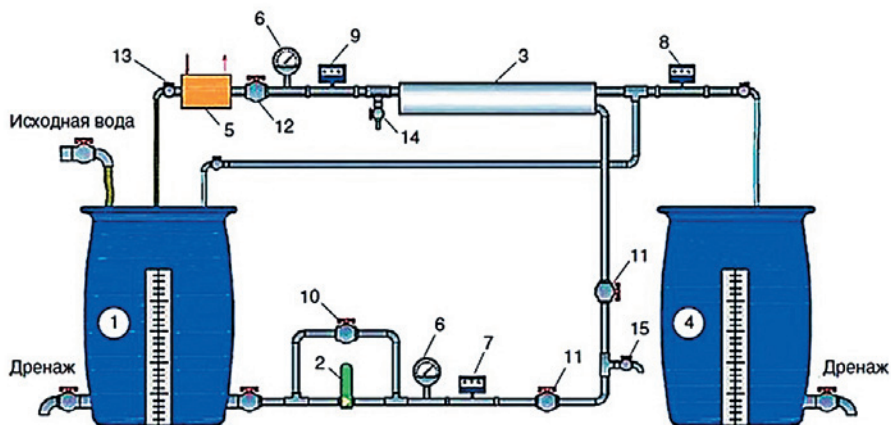


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения параметров работы мембран при разделении фильтрата ТКО: 1 – бак исходной воды; 2 – насос; 3 – мембранный элемент в напорном корпусе; 4 – бак фильтрата; 5 – теплообменник; 6 – манометр; 7–9 – расходомеры; 10 – кран байпаса; 11 – вентиль регулировки расхода исходной воды; 12 – вентиль регулировки рабочего давления и расхода концентрата; 13 – кран регулировки расхода охлаждающей воды; 14, 15 – пробоотборники.

Fig. 2. An experimental plant for determination of the diaphragms operative parameters in division of the TKO filtrate: 1 is an initial water tank; 2 is a pump; 3 is a diaphragm element in a pressure housing; 4 is a filtrate tank; 5 is a heat exchanger; 5 is a manometer; 7-9 are flow gages; 10 is a bypass valve; 11 is control valve for initial water discharge; 12 is an operative pressure and concentrate consumption control; 13 is control valve for cooling water consumption; 14, 15 are sampling devices.

В циркуляционном режиме на экспериментальной установке моделировалась работа мембранных аппаратов на первой и на второй ступени. При этом определялись показатели селективностей мембран по различным загрязнениям и их производительности в зависимости от величины выхода фильтрата установки на каждой ступени (отношение расхода пермеата к расходу исходной воды, поступающей в мембранные аппараты Q_p/Q_i). Определяли зависимости эффективности очистки воды по различным загрязнениям от величины K , которая представляет собой отношение объема исходной воды

к объему концентрата в баке в конце эксперимента и названа коэффициентом концентрирования или коэффициентом уменьшения объема исходной воды в мембранной установке. Величина K соответствует показателю величины выхода пермеата установки, которая равна отношению расхода пермеата к расходу исходной воды Q_p/Q_i , соотношение $Q_p/Q_i = 1-1/K$.

На первой стадии моделировали работу аппаратов первой ступени мембранной установки, при этом в процессе эксперимента объем исходной воды снижался с 20 л до 0,5 л. На второй ступени пермеат первой ступени (объемом 16 л) помещался в бак 1 и эксперимент повторяли, используя мембранный аппарат с низконапорными обратноосмотическими мембранами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены в таблице, на рис. 3 и рис. 4, где показаны значения концентраций загрязнений в пермеатах и концентратах установок 1 и 2 ступеней, а также зависимости селективностей мембран (рис. 5) от K , позволяющие вести расчет установок. На рис. 6 представлено изменение производительности нанофильтрационных и обратноосмотических мембран за время эксперимента в зависимости от величины K . В зависимости от состава фугата можно определить качество очищенной воды.

Таблица. Результаты определения концентраций различных загрязнений в исходной воде, пермеатах и концентратах мембран на разных ступенях очистки
Table. Results of determination of concentrations of various pollutants in the initial water, permeates, and diaphragms concentrates at different stages of purification

Показатель (раствор)	ХПК, мг/л	Al ³⁺ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	Перманганатная окисляемость, мг/л
Исходный фугат	158	8	75	90	21
Пермеат I ступени	19,8	0,42	9,0	65	6,7
Пермеат II ступени	13,5	0,016	0,475	9,7	3,1
Концентрат	650	18,1	702	480	49

На основании полученных результатов могут быть определены типы мембран и параметры установки. Обработка результатов позволила установить зависимости селективностей мембран по различным ионам и загрязнениям. Как отражено на рис. 5, зависимости величины селективности мембраны 70NE от величины K имеют вид натуральной логарифмической функции, что облегчает расчеты по прогнозу качества очищенной воды на разных ступенях очистки [26].

Составленная по результатам эксперимента балансовая схема технологии представлена на рис. 7. На основании балансового расчета определены требуемый расход фильтрата и концентрата установки, а также концентрация солей в концентрате установки, возвращаемом в приемный резервуар уплотнителя осадка при величине выхода фильтрата установки 0,95. Очищенная вода может быть добавлена в очищенную питьевую воду или использоваться в качестве тех-

нической (в котельных и т. д.). Предварительные технико-экономические расчеты показывают, что для случая применения разработанной мембранной установки в цехе обезвоживания осадка Восточной станции водоподготовки, расположенной в Москве, при расходе фугата 20 м^3 в час применение разработанной технологии при стоимости $140\,000 \text{ руб/м}^3$ в час позволяет полностью утилизировать стоки водопроводной станции и получить высокий экономический эффект. При принятой стоимости сброса одного кубометра воды в среднем $28,8 \text{ руб.}$, годовые затраты на сброс в канализацию 20 м^3 в час фугата составят $4\,032\,000 \text{ руб.}$ Стоимость мембранной установки производительностью $20 \text{ м}^3/\text{час}$ составляет $2\,800\,000 \text{ руб.}$ Следует при этом учитывать, что мембранная установка не только сокращает сброс в канализацию, но и увеличивает на 20 м^3 воды в час производительность станции подготовки питьевой воды, поэтому экономический эффект от внедрения такой станции увеличивается в два раза.

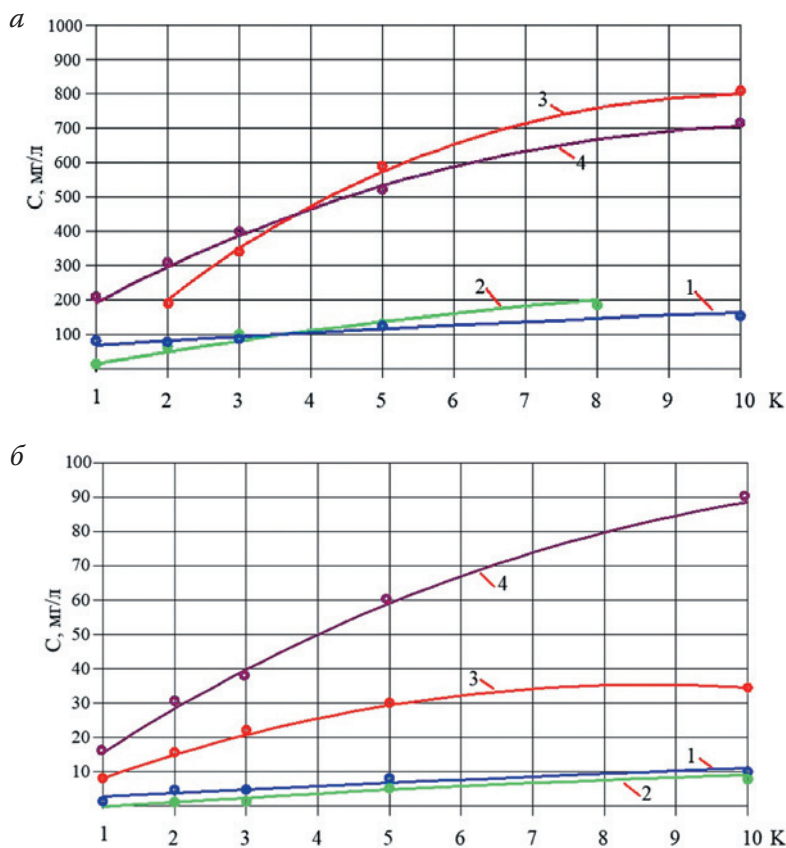


Рис. 3. Зависимости концентраций ионов алюминия, кальция, хлоридов и сульфатов, а также значений ХПК от К в концентрате (а) и пермеате (б) первой ступени установки с нанофильтрационными мембранами:

1 – алюминий; 2 – хлориды; 3 – сульфаты; 4 – ХПК.

Fig. 3. Dependence of the aluminum, calcium, chlorides, sulfates ions concentration and COD value on the K value in concentrate (a) and permeate (b) of the first stage of the nanofiltration diaphragms: 1 is aluminum; 2 is chlorides; 3 is sulfates; 4 is COD.

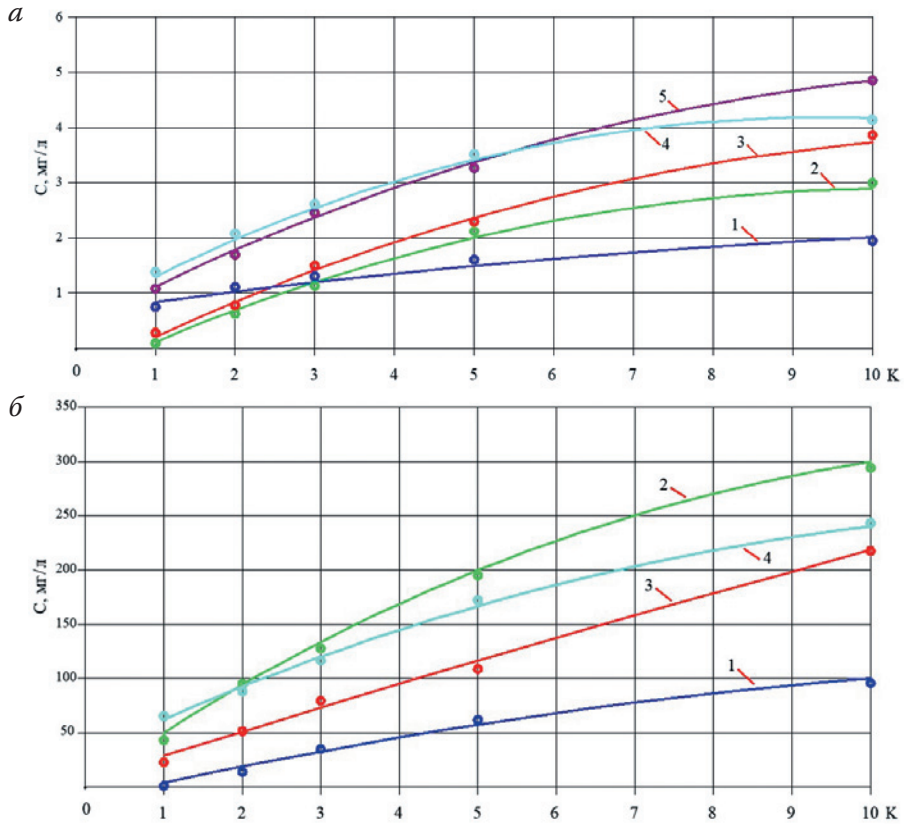


Рис. 4. Зависимости концентраций ионов алюминия, кальция, хлоридов, сульфатов, ХПК от значения К в пермеате (а) и концентрате (б) второй ступени мембранной установки с обратноосмотическими мембранами: 1 – хлориды; 2 – сульфаты; 3 – ХПК; 4 – алюминий; 5 – кальций.

Fig. 4. Dependence of the aluminum, calcium, chlorides, sulfates ions and COD concentration on the K value in permeate (a) and concentrate (b) of the second stage of the diaphragm unit with reverse osmosis diaphragms: 1 is chlorides; 2 is sulfates; 3 is COD; 4 is aluminum; 5 is calcium.

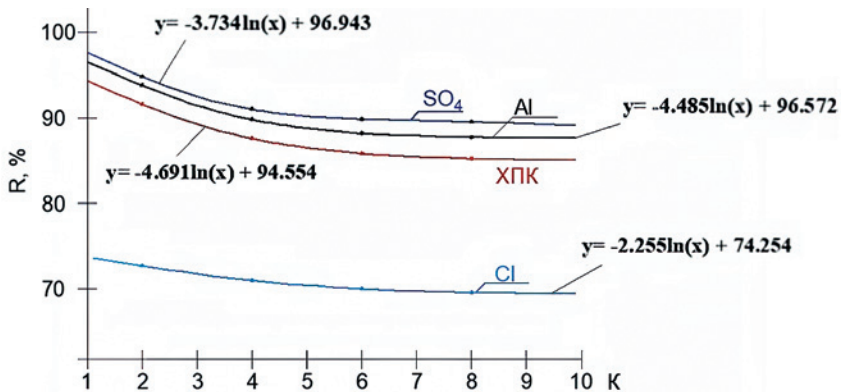


Рис. 5. Зависимости величины селективности R по ионам алюминия, хлорид-ионам, сульфат-ионам и по величине ХПК от К.

Fig. 5. Dependence of the selectivity value R in terms of aluminum ions, chloride-ions, sulphate-ions and COD value on K.

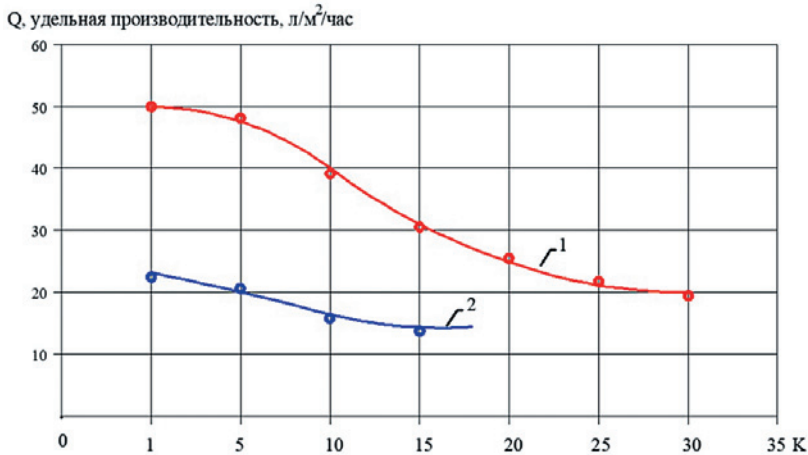


Рис. 6. Изменение величины удельной производительности нанофильтрационных и обратноосмотических мембран в зависимости от величины коэффициента снижения объема К: 1 – нанофильтрационные мембраны на 1 и 3 ступенях; 2 – обратноосмотические мембраны на 2 ступени.

Fig. 6. Changing of the specific capacity value of the nanofiltration and reverse osmosis diaphragms depending on the value of the volume decrease index К: 1 is nanofiltration diaphragms at the 1st and 3rd steps; 2 is reverse osmosis diaphragms at the 2nd step.

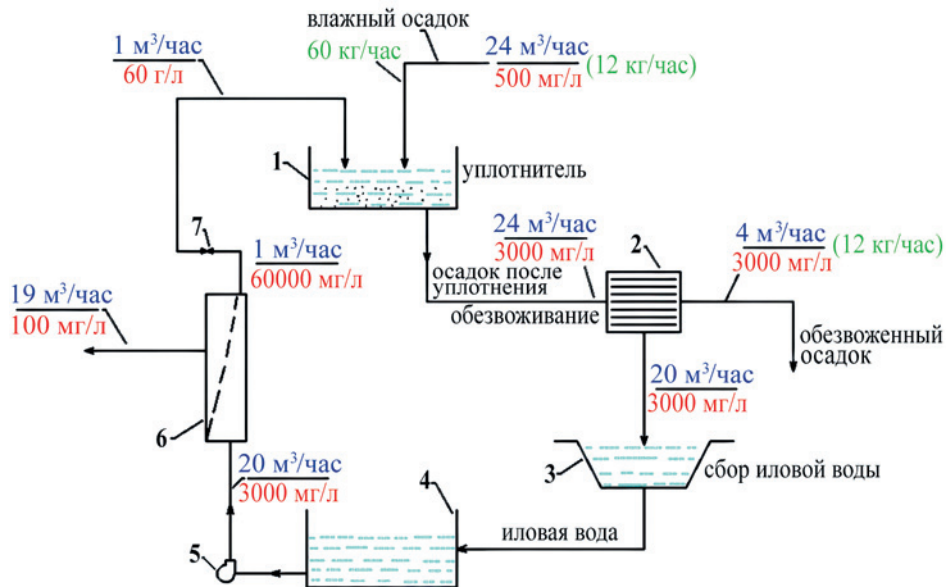


Рис. 7. Балансовая схема обработки осадка и очистки фугата: 1 – уплотнитель осадка, 2 – центрифуга; 3 – бак сбора иловой воды (фугата); 4 – промежуточный резервуар-накопитель фугата; 5 – рабочий насос установки обратного осмоса; 6 – мембранная установка; 7 – регулирующий давление вентиль.

Fig. 7. Balance scheme of the sediment processing and fugate purification: 1 is a sediment concentrator; 2 is a centrifuge; 3 is a tank for silt water (fugate) collection; 4 is an intermediate fugate accumulation tank; 5 is an operative pump of the reverse osmosis plant; 6 is a diaphragm unit; 7 is a pressure control valve.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования предложена технология очистки фугата после обезвоживания осадка станций очистки природных вод, основанная на применении метода обратного осмоса. Технология позволяет не только получить очищенную воду высокого качества, но и удалять все задержанные загрязнения вместе с обезвоженным осадком. Для очистки фугата после обезвоживания осадка методом обратного осмоса может быть эффективно применена двухступенчатая схема, позволяющая одновременно добиться снижения концентраций основных загрязнений в очищенной воде на 90–96 % и многократного сокращения расхода концентрата, благодаря чему все содержащиеся в концентрате задержанные мембранами загрязнения выводятся вместе с обезвоженным осадком.

Анализ стоимости сброса сточных вод в канализацию показывает, что применение технологии очистки окупается менее, чем за один год. С учетом того, что рекомендуемая мембранная технология не только сокращает сброс в канализацию, но и позволяет одновременно получить такое же количество очищенной воды, срок окупаемости значительно сокращается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов М.Н., Благова О.Е., Подковыров В.П., Арутюнова И.Ю., Ягунков С.Ю. Повторное использование сливной воды, образующейся при обработке водопроводного осадка // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10. С. 20–26.
2. Wilf M. The guidebook to membrane for wastewater reclamation. Balaban Desalination Publishing, 2010. 788 p.
3. Yinping Zheng, Sanchuan Yu, Shi Shuai, Qing Zhou, Qibo Cheng, Meihong Liu, Congjie Gao. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination*. 2013. Vol. 314. P. 89–95.
4. Watson B.M., Hornburg C.D. Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies // *Desalination*, 1989, Vol. 72. P. 11–22.
5. Lopes Cristiane N., Petrus José Carlos C., Riella Humberto G. Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Iss. 1. P. 77–83.
6. Rosa Maria Ribeiro, Rosângela Bergamasco, Marcelino Luiz Gimenes. Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent // *Desalination*, 2002. Vol. 145. Iss. 1–3, P. 61–63.
7. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology // *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 241–248.
8. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C., Wybrandt L., Christensen M.L. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process // *Desalination*. 2018. Vol. 440. P. 156–160.
9. Jouni Havukainen, Ali Saud, Thomas Fruergaard Astrup, Petteri Peltola, Mika Horttanainen. Environmental performance of dewatered sewage sludge digestate utilization based on life cycle assessment // *Waste Management*. 2022. Vol. 137. P. 210–221.
10. Roscoe F. Ward, Billy Huston. Wastewater sludge dewatering for Champion-Hamilton treatment facility // *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 155–162.
11. Claire Gourdet, Romain Girault, Sarah Berthault, Marion Richard, Julian Tosoni, Marily Pradel. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P.1123–1136.
12. Dalong Hu, Zhen Zhou, Tianhao Niu, Haijuan Wei, Weixiao Dou, Lu-Man Jiang, Yan Lv. Co-treatment of reject water from sludge dewatering and supernatant from sludge lime stabilization

- process for nutrient removal: A cost-effective approach // Separation and Purification Technology. 2016. Vol. 172. P. 357–365.
13. Podstawczyk D., Witek-Krowiaka A., Dawiec-Liśniewska A., Chrobot P., Skrzypczak D. Removal of ammonium and orthophosphates from reject water generated during dewatering of digested sewage sludge in municipal wastewater treatment plant using adsorption and membrane contactor system // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 161. P. 277–287.
 14. KołECKA K., Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H., Dariusz R. Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland // Ecological Engineering. 2017. Vol. 98. P.346–353.
 15. Koskue V., Freguia S., Ledezma P., Kokko M. Efficient nitrogen removal and recovery from real digested sewage sludge reject water through electroconcentration // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 106286. pp.
 16. Xavier Flores-Alsina, Elham Ramin, David Ikumi, Theo Harding, Damien Batstone, Chris Brouckaert, Sven Sotemann, Krist V.Gernaey. Assessment of sludge management strategies in wastewater treatment systems using a plant-wide approach // Water Research. 2021. Vol. 190. P. 116714.
 17. Dong Xu, Jun Liu, Ting Ma, Yongqing Gao, Shujun Zhang, Jun Li. Rapid granulation of aerobic sludge in a continuous-flow reactor with a two-zone sedimentation tank by the addition of dewatered sludge // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 41. P. 101941.
 18. Wan-JunDuan, Jing-Feng Gao, Wen-Zhi Zhang, Yu-Wei Wang, Jie Liu. Elimination of antibiotic resistance genes in waste activated sludge by persulfate treatment during the process of sludge dewatering // Bioresource Technology. 2020. Vol. 311. P. 123509.
 19. Maria Elisa Magri, Joceli Gorrezen Zaguini Francisco, Pablo Heleno Sezerino, Luiz Sérgio Philippi. Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge // Ecological Engineering. 2016. Vol. 95. P. 316–323.
 20. S.V. Jadhav, S.S.Haramkar, A.R.Kamble, B.N.Thorat. Insights into dewatering and characterization of the waste activated sludge // Journal of the Taiwan Institute of Chemical. 2019. Vol. 94. P. 81–87.
 21. Samuel Bunani, ErenYörükoğlu, Gökhan Sert, Ümran Yüksel, MithatYüksel, Nalan Kabay. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water // Desalination. 2013. Vol. 315. P. 33–36.
 22. Nguyen S.T., Roddick F.A. Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration // Separation and Purification Technology. 2013. Vol. 103. P. 313–320.
 23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Marco Carnevale Miino, Silvestro Damiania. Treatments for color removal from wastewater: State of the art // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 236. P. 727–745.
 24. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries // Membranes and Membrane Technologies. 2020. Vol. 2. No. 5. P. 296–309.
 25. Первов А.Г., Ширкова Т.Н., Спицов Д.В. Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран // Вестник МГСУ. 2021. № 6. С. 698–719.
 26. Первов А.Г., Ширкова Т.Н. Сокращение расходов концентратов установок обратного осмоса, используемых для очистки сточных вод, содержащих органические загрязнения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 4 (132). С. 36–50.

REFERENCES

1. Kozlov M.N., Blagova O.E., Podkovyrov V.P., Arutyunova I.Yu., Yagunkov S.Yu. Reuse of drain water formed during the treatment of tap sludge. *Water supply and sanitary engineering*. 2010. No. 10. P. 20–26 (In Russ.).
2. Wilf M. The guidebook to membrane for wastewater reclamation. Balaban Desalination Publishing, 2010. 788 p.

3. Yinping Zheng, Sanchuan Yu, Shi Shuai, Qing Zhou, Qibo Cheng, Meihong Liu, Congjie Gao. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination*. 2013. Vol. 314. P. 89–95.
4. Watson B.M., Hornburg C.D. Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies. *Desalination*. 1989. Vol. 72. P. 11–22.
5. Lopes Cristiane N., Petrus José Carlos C., Riella Humberto G.. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005. Vol. 172. Iss. 1. p. 77–83.
6. Rosa Maria Ribeiro, Rosângela Bergamasco, Marcelino Luiz Gimenes. Membranes synthesis study for color removal of a textile effluent. *Desalination*. 2002. Vol.145. Iss. 1–3, P. 61–63.
7. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology. *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 241–248.
8. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C., Wybrandt L., Christensen M.L. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process. *Desalination*. 2018. Vol. 440. P. 156–160.
9. Jouni Havukainen, Ali Saud, Thomas Fruergaard Astrup, Petteri Peltola, Mika Horttanainen. Environmental performance of dewatered sludge sludge digest utilization based on life cycle assessment. *Waste Management*. 2022. Vol. 137. P. 210–221.
10. Roscoe F. Ward, Billy Huston. Wastewater sludge dewatering for Champion-Hamilton treatment facility. *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 155–162.
11. Claire Gourdet, Romain Girault, Sarah Berthault, Marion Richard, Julian Tosoni, Marilys Pradel. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 1123–1136.
12. Dalong Hu, Zhen Zhou, Tianhao Niu, Haijuan Wei, Weixiao Dou, Lu-Man Jiang, Yan Lv. Co-treatment of reject water from sludge dewatering and supernatant from sludge lime stabilization process for nutrient removal: A cost-effective approach. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 172. P. 357–365.
13. Daria Podstawczyk, Anna Witek-Krowiaka, Anna Dawiec-Liśniewska, Przemysław Chrobot, Dawid Skrzypczak. Removal of ammonium and orthophosphates from reject water generated during dewatering of digested sewage sludge in municipal wastewater treatment plant using adsorption and membrane contactor system. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 161. P. 277–287.
14. Katarzyna Kolečka, Magdalena Gajewska, Hanna Obarska-Pempkowiak, Dariusz Rohde. Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland. *Ecological Engineering*. 2017. Vol. 98. P. 346–353.
15. Veera Koskue, Stefano Freguia, Pablo Ledezma, Marika Kokko. Efficient nitrogen removal and recovery from real digested sewage sludge reject water through electroconcentration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 106286. P. 106286.
16. Xavier Flores-Alsina, Elham Ramin, David Ikumi, Theo Harding, Damien Batstone, Chris Brouckert, Sven Sotemann, Krist V.Gernaey. Assessment of sludge management strategies in wastewater treatment systems using a plant-wide approach. *Water Research*. 2021. Vol. 190. P. 116714.
17. Dong Xu, Jun Liu, Ting Ma, Yongqing Gao, Shujun Zhang, Jun Li. Rapid granulation of aerobic sludge in a continuous-flow reactor with a two-zone sedimentation tank by the addition of dewatered sludge. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 41. P. 101941.
18. Wan-JunDuan, Jing-Feng Gao, Wen-Zhi Zhang, Yu-Wei Wang, Jie Liu. Elimination of antibiotic resistance genes in waste activated sludge by persulfate treatment rapid during the process of sludge dewatering. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 311. pp. 123509
19. Maria Elisa Magri, Joceli Gorrezen Zaguini Francisco, Pablo Heleno Sezerino, Luiz Sérgio Philippi. Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 316–323.
20. Jadhav S.V., Haramkar S.S., Kamble A.R., Thora B.N.. Insights into dewatering and characterization of the waste activated sludge. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical*. 2019. Vol. 94. P. 81–87.

21. Samuel Bunani, ErenYörükoğlu, Gökhan Sert, Ümran Yüksel, MithatYüksel, Nalan Kabay. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water. *Desalination*. 2013. Vol. 315. P. 33–36.
22. Nguyen S.T., Roddick F.A.. Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration. *Separation and Purification Technology*. 2013. Vol.103. P. 313–320.
23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Marco Carnevale Miino, Silvestro Damiana. Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 236. P.727–745.
24. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 5. P. 296–309.
25. Pervov A.G., Shirkova T.N., Spitsov D.V. Economic aspects of cleaning filtrates of landfills of solid municipal waste storage with the use of membranes. *Bulletin of MGSU*. 2021. No. 6. P. 698–719 (In Russ.).
26. Pervov A.G., Shirkova T.N. Cost reduction of reverse osmosis plant concentrates used for wastewater treatment containing organic pollutants. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products*. 2021. No. 4 (132). P. 36–50 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Первов Алексей Германович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-7518-2342; e-mail: PervovAG@mgsu.ru

Спицов Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-6252-9485; e-mail: SpitsovDV@mgsu.ru

Тет Зо Аунг, аспирант, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-5982-8983; e-mail: newmoon68109@gmail.com

About the authors

Aleksey G. Pervov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia; ORCID: 0000-0002-7518-2342; e-mail: PervovAG@mgsu.ru

Dmitriy V. Spitsov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia. ORCID: 0000-0001-6252-9485; e-mail: SpitsovDV@mgsu.ru

Htet Zo Aung, Postgraduate student of the Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia; ORCID: 0000-0002-5982-8983; e-mail: newmoon68109@gmail.com