



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544:543.421;422:615.322

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9026

Селективность и задерживающая способность композиционных мембран при нанофильтрации сильно загрязненных сточных вод

Динар Дильшатович Фазуллин[✉], Геннадий Витальевич Маврин

Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия, denr3@yandex.ru[✉]

Аннотация. В работе исследованы свойства композиционных мембран и основные параметры процесса нанофильтрации сточных вод. Композиционная мембрана НАЦ-3 получена на подложке из нейлоно-вой сетки с поверхностным слоем из ацетата целлюлозы. Поверхностные свойства исходной подложки и композиционной мембраны исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки «LEO-1430 VP». Коэффициент задержания мембран определен по составу ионов, содержание которых установлено методами ионной хроматографии и атомно-абсорбционной спектроскопии.

Нанофильтрации подвергали сточную воду полигона ТКО, с УЭП равной 4270 мкСм/см. За время процесса нанофильтрации, в течение 60 минут, наблюдается снижение проницаемости мембраны НАЦ-3 в 3 раза. Производительность мембран интенсивно снижается в течение первых 1-3 минут процесса, что связано с явлением концентрационной поляризации из-за высокой концентрации растворенных солей и органических соединений, которое, в последующем, приводит к образованию над поверхностным слоем мембраны гелевого слоя, также сорбции коллоидных частиц в порах мембраны. Среднее значение проницаемости мембраны по сточной воде составило 0.074 дм³/м²с·КПа при давлении 0.65 МПа, что в 3 раза ниже производительности мембраны по дистиллированной воде.

По результатам исследования коэффициент задержания поллютантов из сточной воды в среднем составил 0.62. Коэффициент задержания у полученной мембраны высокий по отношению к многовалентным ионам – 0.84, по ионам тяжелых металлов – 0.7 и по показателям ХПК и цветности воды порядка 0.9, что не уступает характеристикам коммерческой мембраны нанофильтрации марки ОПМН П. Результаты исследования могут быть использованы в областях мембранной технологии, химической технологии, промышленной экологии.

Ключевые слова: композиционная мембрана, нейлон, ацетат целлюлозы, очистка сточных вод, ионная хроматография, селективность, проницаемость

Для цитирования: Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В. Селективность и задерживающая способность композиционных мембран при нанофильтрации сильно загрязненных сточных вод // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 1. С. 69-78. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9026>

Original article

Selectivity and retention capacity of composite membranes for nanofiltration of heavily polluted wastewater

Dinar D. Fazullin[✉], Gennady V. Mavrin

Lyudmila A. Deineka¹, Vladimir F. Selemenev²

Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russia, denr3@yandex.ru[✉]

Abstract. In our study, we analysed the properties of composite membranes and the basic parameters of the wastewater nanofiltration process. The composite NATs-3 membrane was produced on a nylon mesh substrate with a cellulose acetate surface layer. The surface properties of the original substrate and the composite membrane were investigated using a LEO-1430 VP scanning electron microscope (SEM). The membrane retention



coefficient was determined by ion composition studied by ion chromatography and atomic absorption spectroscopy.

Wastewater from a landfill was subjected to nanofiltration, with a specific electrical conductivity of 4270 $\mu\text{S}/\text{cm}$. During the nanofiltration process, the permeability of the NATs-3 membrane decreased by 3 times in 60 minutes. The membrane capacity reduced significantly during the first 1-3 minutes of the process. It was due to the concentration polarisation phenomenon induced by the high concentration of dissolved salts and organic compounds. This results in the formation of a gel layer over the membrane surface as well as the sorption of colloidal particles in the membrane pores. The average value of the membrane permeability for wastewater was $0.074 \text{ dm}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{KPa}$ at a pressure of 0.65 MPa, which is 3 times lower than the membrane permeability for distilled water.

The results of the study show the average pollutant retention coefficient from wastewater was 0.62. The obtained membrane had high retention coefficient in relation to multivalent ions - 0.84, to heavy metal ions - 0.7, and in relation to the COD and colour of water - of about 0.9. The results equal the performance of a commercial OPMN-P nanofiltration membrane. The results of the study can be used in membrane technology, chemical technology, and industrial ecology.

Keywords: composite membrane, nylon, cellulose acetate, wastewater treatment, ion chromatography, selectivity, permeability

For citation: Fazullin D.D., Mavrin G.V. Selectivity and retention capacity of composite membranes for nanofiltration of heavily polluted wastewater. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(1): 69-78. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9026>

Введение

Фильтраты свалок твердых коммунальных отходов (ТКО) это высокотоксичные сточные воды, содержащие различные загрязнители, такие как органические соединения, биологические организмы, ксенобиотики, тяжелые металлы, неорганические соли и аммиак. Постоянно растущие требования к охране окружающей среды создают во многих странах проблемы с очисткой сточных вод, образующихся на полигонах ТКО. Традиционные методы очистки сточных вод такие как: методы осаждения, фильтрация, флотация, коагуляция, химические, биологические и термические методы не обладают высокой задерживающей способностью, что в свою очередь наносит вред окружающей природной среде. Одним из способов повышения степени очистки данных типов сточных является интеграция традиционных методов с мембранными технологиями.

Применение мембранных технологий повышает эффективность очистки сточных вод более чем на 95%, повышается и производительность очистки сточных вод при более низких затратах в сравнении с традиционными методами. Из баромембранных процессов наиболее опти-

мальным для очистки сточных вод является процесс нанофильтрации [1-4]. Характеристики нанофильтрации находятся между ультрафильтрацией и обратным осмосом, и разделение происходит как за счет разделения потока, так и за счет механизмов диффузии раствора. Некоторые нанофильтрационные мембраны имеют поверхностный заряд, препятствующий прохождению сильнополярных молекул и заряженных ионов. Технология нанофильтрации используется в различных системах очистки воды и сточных вод. Основная задача нанофильтрации – селективное удаление ионов и органических соединений. Для процесса нанофильтрации требуется более низкое рабочее давление, чем процессу обратного осмоса, так же мембраны нанофильтрации отличаются большой удельной производительностью чем мембраны обратного осмоса.

Коммерческие мембраны нанофильтрации часто используются для очистки сточных вод. Так в работе [5] авторы установили степень очистки сточных вод из полигона ТКО методом нанофильтрации по таким показателям, как химическое потребление кислорода (ХПК), содержание нитрат ионов, катионов аммо-



ния, ионов тяжелых металлов. Задерживающая способность мембраны по данным показателям была близка к 85%, за исключением нитрат- и аммоний-ионов. В работе [6] нанофильтрацию сточных вод полигона ТКО провели с использованием коммерческих полимерных мембран марок SR100 и NP030. Степень очистки сточных вод оценили по показателю ХПК, которая составила 90%. Концентрация ХПК после очистки соответствовала требованиям норматива. А в работе [7] авторы исследовали очистку сточных вод из полигона содержащих отходы фармацевтического происхождения методами озонирования, нанофильтрации и мембранного биореактора. Из использованных методов наиболее эффективным оказался метод нанофильтрации со степенью очистки от 79 до 99% в зависимости от удаляемого показателя.

К одним из опасных компонентов, содержащимся в сточных водах полигона ТКО, относятся полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). В работе [8] исследовали способность удаления данных соединений методом нанофильтрации с использованием мембраны из тонкопленочного полиамида, по результатам исследования средняя степень очистки 16 видов ПАУ составила более 80%.

Существующие на рынке нанофильтрационные мембранные элементы в основном предназначены для очистки питьевых и технических вод и обладают высокой стоимостью. В настоящее время часто встречаются работы, направленные на разработку композиционных мембран [9,10] или модификацию существующих мембран [11], где основные усилия исследователей направлены на снижение себестоимости получаемых мембран [12], повышение производительности мембран и улучшение поверхностных свойств мембран: прочности, снижение сорбции загрязняющих веществ [13-15].

Цель данной работы заключается в исследовании свойств композиционной

мембраны с поверхностным слоем из ацетата целлюлозы и основных параметров процесса нанофильтрации сточных вод.

Экспериментальная часть

Композиционную мембрану марки НАЦ-3 получили путем погружения нейлоновой сетки с размером ячеек 20 мкм в 5%-ный раствор ацетата целлюлозы (АЦ) в ацетоне. Мембрана погружалась в раствор в горизонтальном положении на глубину 0.5-1 см. После извлечения, на поверхности основы образуется тонкий слой АЦ. Для стабилизации поверхностного слоя, мембрана подвергается процессу сушки, которая проводилась в течении суток при комнатной температуре, с последующей сушкой в течении 1 часа при температуре 35°C в лабораторном термостате. Толщина получаемой пленки полимера регулируется повторным нанесением необходимого количества слоев. Так, путем нанесения последующих новых слоев с сушкой между нанесением нового слоя получена нанофильтрационная мембрана НАЦ-3, состоящая из трех слоев АЦ.

Содержание наносимого поверхностного слоя АЦ в составе мембраны установили с помощью аналитических весов марки «CAS CAUW-220D» гравиметрическим методом, путем измерения массы исходной подложки – нейлоновой сетки и по массе полученной мембраны. Класс точности весов по ГОСТ Р 53228-2008 специальный (I), погрешность измерения ± 0.0001 г.

Общая пористость мембраны – доля объема сообщающихся и изолированных пор в общем объеме пористого тела, определялась путем пропитки образца абсолютно смачивающей мембраны жидкостью и измерением массы до и после пропитки. По полученным данным с учетом плотности жидкости и мембраны рассчитывалась общая пористость:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{(m_k - m_0)}{V\rho_{\text{ж}}} 100\% \\ &= \frac{\frac{m_k - m_0}{\rho_{\text{ж}}}}{\frac{m_k - m_0}{\rho_{\text{ж}}} + \frac{m_0}{\rho_m}} 100\% \end{aligned}$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; ρ_m – плотность мембраны; m_0 – масса исходной мембраны; m_k – масса мембраны после пропитки дистиллированной водой.

Микрофотографии исходной подложки и композитной мембраны получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки «LEO-1430 VP».

Процесс нанофильтрации (НФ) композитной мембраной НАЦЗ и коммерческой мембраной марки ОПМН-П проводился на лабораторной установке мембранного разделения, состоящей из емкости с исходной жидкостью, насоса высокого давления, манометра, мембранного элемента, регулятора давления и емкости для сбора фильтрата. Исходная жидкость разделялась мембраной на фильтрат и концентрат, последний возвращался в емкость с исходной жидкостью. Процесс мембранного разделения проводился в следующих условиях: исходная жидкость – сточная вода полигона ТКО; удельная электрическая проводимость (УЭП) – 4270 мкСм/см; химическое потребление кислорода (ХПК) – 1399 мгО₂/дм³, рН – 8.0; рабочее давление процесса микрофильтрации – 0.1 МПа, нанофильтрации – 0.65 МПа; температура жидкости – 25.1 °С; конверсия (степень отбора пермеата) – 80-82%.

Для оценки эффективности процесса НФ определяли удельную производительность мембран по дистиллированной и сточной воде, а также задерживающую способность и селективность мембран по показателям цветность воды, химическое потребление кислорода (ХПК), удельная электрическая проводимость (УЭП), по содержанию ионов NH₄⁺, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Cl⁻, Fe³⁺, Mn²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺.

Основными параметрами мембран является проницаемость и коэффициент задержания. Проницаемость мембран определялась по дистиллированной и сточной воде, как отношение количества образующегося фильтрата к произведению площади мембраны и времени процесса в пересчете на м³/м²·с·кПа.

Концентрацию макро ионов в сточной воде и в фильтрате мембран определяли методом ионной хроматографии на хроматографической системе марки «Стайер-CD» с кондуктометрическим детектированием на аналитической колонке для катионов марки «Shodex IC YS-50». Содержание анионов определяли с использованием аналитической колонки марки «Star-Ion A300».

Концентрацию ионов металлов в исходных растворах и в пермеатах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией марки «Квант Z.ЭТА».

Цветность сточной воды и фильтратов мембран измеряемый в градусах цветности определили фотометрическим методом с помощью спектрофотометра марки «UNICO 2800» измерением оптической плотности анализируемой пробы воды при длине волны 413 нм с последующим определением значения цветности по градуировочному графику.

ХПК является общепринятым, важным и достаточно быстро определяемым показателем для характеристики загрязнения природных и сточных вод органическими соединениями. ХПК определяли титрованием избытка бихромата калия солью Мора.

УЭП проб сточной воды и фильтратов определяли в соответствии с методическими указаниями методом прямой кондуктометрии с помощью кондуктометра марки «Анион-7020».

Водородный показатель проб установили потенциометрическим методом с помощью рН-метра марки «Анион-4100».

Таблица 1. Свойства мембранных элементов
 Table 1. Membrane element properties

Мембрана	Количество слоев АЦ	Содержание АЦ, % (по массе)	Общая пористость, %	Водопоглощение, %
Сетка из нейлона	-	-	20.5	17.3
НАЦ-3	3	51.2	30.8	39.8
ОПМН-П	-	-	37.6	42.3

Обсуждение результатов

В результате нанесения АЦ из 5%-ного раствора ацетона на подложку микропористой сетки из нейлона получена композиционная мембрана НАЦ-3, свойства мембран представлены в таблице 1.

После нанесения на подложку трех слоев АЦ, содержание АЦ в мембране составило 45%. Также установлено увеличение водопоглощения и общей пористости мембран после нанесения трех слоев АЦ. Значения общей пористости и водопоглощения коммерческой мембраны оказались больше чем у композиционных мембран на 3.2 и 1.2% соответственно.

На рисунке 1 представлены электронные микрофотографии подложки мембраны из нейлоновой сетки и композиционной мембраны НАЦ-3.

По результатам сканирующей электронной микроскопии (рис. 1а) основа мембраны из нейлона представляет собой сетчатый материал с размерами ячеек 20 мкм, а после нанесения композиционного

слоя из АЦ поверхность мембраны становится гладкой (рис. 1б).

Полученную мембрану нанофильтрации НАЦ-3 и коммерческую мембрану марки ОПМН-П использовали для очистки хозяйственной сточной воды, образцы которой были очищены методом микрофильтрации. Начальный объем сточной воды составил 5 дм³, с помощью коммерческой мембраны ОПМН-П после очистки получили фильтрат объемом 4.09 дм³, с мембраной НАЦ-3 объем фильтрата составил 4.04 дм³.

Основными параметрами процесса мембранного разделения являются проницаемость и коэффициент задержания. По результатам исследования установлена проницаемость мембран по дистиллированной и сточной воде, результаты представлены в таблице 2.

Начальная проницаемость подложки мембраны высокая – 285 дм³/м²·с·КПа, но после нанесения трех слоев из ацетата целлюлозы снижается в 1300 раз до 0.21 дм³/м²·с·КПа, что выше проницаемости коммерческой мембраны марки

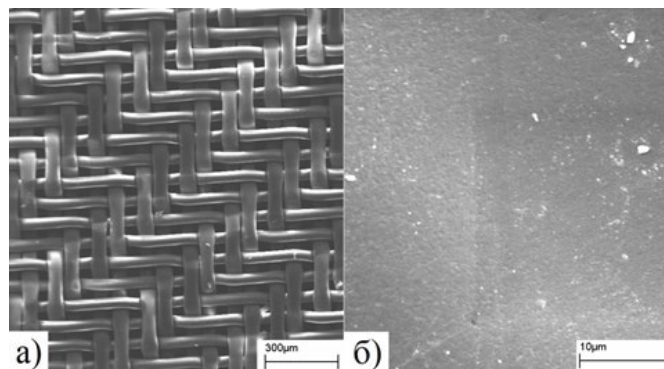


Рис. 1. Электронные микрофотографии мембран: а) подложка из нейлоновой сетки (увеличение 100 раз); б) композиционная мембрана НАЦ-3 (увеличение в 1000 раз)

Fig. 1. Electron micrographs of the membranes: a) nylon mesh substrate (100-fold magnification); b) NATs-3 composite membrane (1000-fold magnification).

Таблица 2. Проницаемость нанофильтрационных мембран
Table 2. Permeability of the nanofiltration membranes

Мембрана	Процесс	Рабочее давление, МПа	Проницаемость мембран, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{КПа}$ (P=0.95, n=2)	
			по дист. воде	по сточной воде
Сетка из нейлона	МФ	0.1	285±29	271±27
НАЦ-3	НФ	0.65	0.21±0.02	0.074±0.007
ОПМН-П	НФ	0.65	0.20±0.02	0.064±0.006

ОПМН-П. Проницаемость мембран при очистке сточной воды снижается 2.7-3.2 раза в сравнении с проницаемостью по дистиллированной воде, что связано с высокой степенью загрязненностью сточной воды, состав которой представлен в таблице 3.

В ходе экспериментов определены изменения проницаемости процесса нанофильтрации сточной воды в зависимости от времени с использованием композиционной и коммерческой мембран. Результаты представлены на рисунке 2.

За время процесса нанофильтрации в течение 60 минут наблюдается снижение проницаемости мембраны НАЦ-3 в 3 раза. Проницаемость мембран интенсивно снижается в течение первых 1-3 минут процесса, что связано с явлением концентрационной поляризации из-за высокой концентрации растворенных солей и органических соединений, которое, в последующем, приводит к образованию над поверхностным слоем мембраны гелевого слоя, а также с сорбцией коллоидных частиц в порах мембраны. Для восстановления проницаемости мембран предлагается регенерация путем обратной промывки мембранных элементов в течение 10 минут с 1-3% раствором додецилсульфата натрия при температуре раствора 30-35°C и последующая промывка водопроводной или дистиллированной водой.

Состав и свойства сточной воды до и после очистки методом нанофильтрации представлены в таблице 3. Хроматограммы исследования состава катионов в исходной сточной воде и в фильтратах мембран представлены на рисунке 3.

В исходной сточной воде превышены допустимые значения концентраций согласно постановлению Правительства РФ от 03.11.2016 № 1134 по следующим показателям: ХПК, ионы железа, ионы цинка. Если данный водный объект отнести к рыбохозяйственным, то в концентрации поллютантов в сточной воде превышают по следующим показателям: хлорид-ион, нитрат-ион, сульфат-ион, фосфат-ион, аммоний-ион, ионы калия, ионы натрия, ХПК, а также по всем исследованным ионам тяжелых металлов. После очистки сточной воды с помощью нанофильтрационных мембран марки НАЦ-3 и ОПМН-П наблюдается снижение концентрации загрязняющих веществ. Допустимые концентрации загрязняющих веществ по первому нормативу в фильтратах мембран не превышают норматив. При сравнении с концентрацией поллютантов с ПДК для вод рыбохозяйственного значения остаются превышения по показателям: хлорид-ион, фосфат-ион, аммоний-ион, ионы калия, натрия, магния, железа, меди, марганца, цинка. В случае необходимости очистки сточных вод до требований нормативов рыбо-хозяйственного значения потребуется доочистка с помощью мембран обратного осмоса.

Коэффициент задержания нанофильтрационных мембран установленная при очистке сточной воды представлена в таблице 4.

По результатам исследования в среднем коэффициент задержания поллютантов из сточных вод с помощью нанофильтрационных мембран НАЦ-3 и ОПМН-П составила соответственно 0.68 и 0.64.

Таблица 3. Состав и свойства сточной воды и фильтратов нанофильтрационных мембран НАЦ-3 и ОПМН-П

Table 3. Composition and properties of wastewater and NATs-3 and OPMN-P nanofiltration membrane filtrates

Показатель	Концентрация (P=0.95, n=2)		Норматив ¹	Норматив ²	
	Исходная	Фильтрат			
		НАЦ-3			ОПМН-П
Водородный показатель, ед. рН	8.0±0.1	7.6±0.1	7.6±0.1	6-9	-
ХПК, мгО ₂ /дм ³	1306±313	162±39	155±37	500	-
Цветность, градусы	306±31	22±4	24±5	-	-
Хлорид-ион, мг/дм ³	618±62	328±33	409±41	1000	300
Нитрат-ион, мг/дм ³	48.2±4.8	<0.1	<0.1	-	40
Сульфат-ион, мг/дм ³	46.3±4.6	3.1±0.6	2.6±0.5	1000	100
Фосфат-ион, мг/дм ³	10.4±2.1	0.34±0.07	0.19±0.04	12	0.2
Аммоний-ион, мг/дм ³	575±58	317±32	379±38	-	0.5
Калий, мг/дм ³	268±29	171±17	164±16	-	50
Натрий, мг/дм ³	241±24	136±14	173±17	-	120
Кальций, мг/дм ³	77.6±7.8	35.4±3.5	56.9±5.7	-	180
Магний, мг/дм ³	149±15	85.5±8.6	93.1±9.3	-	40
Ионы железа, мг/дм ³	8.01±1.98	1.74±0.44	1.95±0.49	5	0.1
Ионы меди, мг/дм ³	0.37±0.09	0.13±0.03	0.15±0.04	1	0.001
Ионы свинца, мг/дм ³	0.029±0.007	0.006±0.002	0.007±0.002	0.25	0.006
Ионы марганца, мг/дм ³	0.114±0.029	0.037±0.009	0.031±0.008	1	0.01
Ионы кадмия, мг/дм ³	0.0029 ±0.0007	0.0007 ±0.0002	0.0014 ±0.0004	0/015	0.005
Ионы цинка, мг/дм ³	2.08±0.52	0.91±0.23	0.59±0.15	1	0.01

¹Максимально допустимые значения концентраций загрязняющих веществ в сточных водах по постановлению Правительства РФ от 03.11.2016 №1134; ²Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения

¹Maximum permissible values of pollutant concentration in wastewater according to Decree of the Government of the Russian Federation No. 1134 dated November 3, 2016; ²Maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances in water bodies of commercial fishing importance.

По данным таблицы 4 коэффициент задержания в среднем по ионам композиционной мембраной, состоящей из трех слоев АЦ, составила 0.62, а у коммерческой мембраны ОПМН-П равна 0.55. Селективность нанофильтрационной мембраны НАЦ-3 высокая по отношению к ионам NO₃⁻>PO₄³⁻>SO₄²⁻>Ca²⁺, и низкая – по отношению к ионам K⁺, Na⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Cl⁻. При анализе коэффициента задержания мембран в зависимости от валентности ионов, установлено, что по многовалентным ионам селективность выше, чем по одновалентным ионам – 0.84 и 0.45, соответственно. У коммерческой мембраны марки «ОПМН-П» также

отмечен высокий коэффициент задержания по отношению к двухвалентным ионам, которая составляет 0.82, а по одновалентным ионам всего 0.33. Избирательность композитной мембраны по анионам и катионам отличается, коэффициент задержания по анионам лучше и составляет 0.84, по катионам – 0.44.

Коэффициент задержания ионов тяжелых металлов мембраной НАЦ-3 в среднем составляет 0.7, что чуть выше чем у мембраны ОПМН-П. Селективность мембраны НАЦ-3 по ионам тяжелых металлов располагается в следующем порядке: Pb²⁺>Fe³⁺>Cd²⁺>Mn²⁺>Cu²⁺>Zn²⁺.

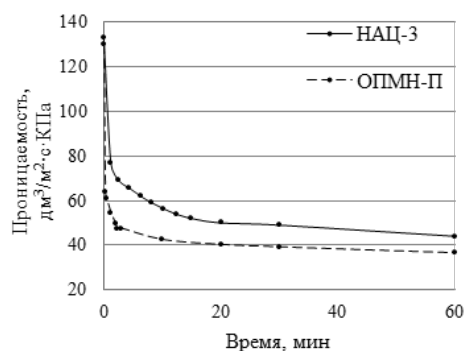


Рис. 2. Зависимость проницаемости мембран от времени процесса нанофильтрации: сплошная линия – НАЦ-3; прерывистая линия – ОПМН-П.

Fig. 2. Dependence of membrane permeability on the time of the nanofiltration process: solid line – NATs-3; dashed line – OPMN-P.

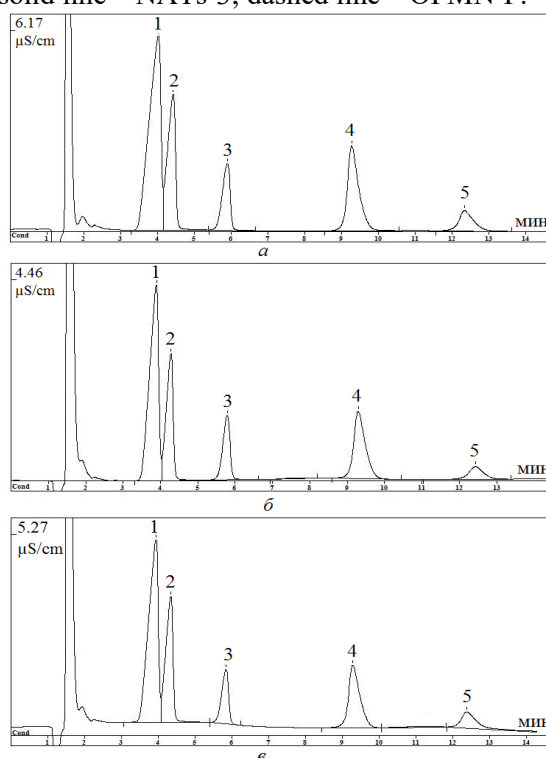


Рис. 3. Хроматограммы катионного состава исследуемых проб полученные на хроматографической системе «Стайер-CD» с кондуктометрическим детектированием на аналитической колонке «Shodex IC YS-50»: а – исходная сточная вода; б – фильтрат НАЦ-3; в – фильтрат ОПМН-П (1 – NH₄⁺; 2 – Na⁺; 3 – K⁺; 4 – Mg²⁺; 5 – Ca²⁺).

Fig. 3. Chromatograms of the cationic composition of the studied samples obtained on the chromatographic system "Stayer-CD" with conductometric detection on the analytical column "Shodex IC YS-50": a - initial waste water; b – NAC-3 filtrate; c – OPMN-P filtrate (1 – NH₄⁺; 2 – Na⁺; 3 – K⁺; 4 – Mg²⁺; 5 – Ca²⁺).

Коэффициент задержания предлагаемой композиционной и коммерческой мембраны по показателю ХПК составила 0.88.

Заключение

Сточные воды полигона ТКО отличаются высокой концентрацией поллютантов и высокой минерализацией. Для сточной воды методом нанофильтрации полу-

Таблица 4. Коэффициент задержания нанофильтрационных мембран НАЦ-3 и ОПМН-П
 Table 4. Retention coefficient of nanofiltration membranes NAC-3 and OPMN-P

Показатель	Исходная концентрация (P=0.95, n=2)	Коэффициент задержания	
		НАЦ-3	ОПМН-П
ХПК, мгО ₂ /дм ³	1306±313	0.88	0.88
Цветность, градусы	306±31	0.93	0.92
Хлорид-ион, мг/дм ³	618±62	0.47	0.34
Нитрат-ион, мг/дм ³	48.2±4.8	0.99	0.99
Сульфат-ион, мг/дм ³	46.3±4.6	0.93	0.94
Фосфат-ион, мг/дм ³	10.4±2.1	0.97	0.98
Аммоний-ион, мг/дм ³	575±58	0.45	0.34
Калий, мг/дм ³	268±29	0.36	0.38
Натрий, мг/дм ³	241±24	0.44	0.28
Кальций, мг/дм ³	77.6±7.8	0.54	0.27
Магний, мг/дм ³	149±15	0.43	0.38
Ионы железа, мг/дм ³	7.92±1.98	0.78	0.75
Ионы меди, мг/дм ³	0.37±0.09	0.64	0.60
Ионы свинца, мг/дм ³	0.029±0.007	0.79	0.76
Ионы марганца, мг/дм ³	0.114±0.029	0.68	0.73
Ионы кадмия, мг/дм ³	0.0029±0.0007	0.76	0.52
Ионы цинка, мг/дм ³	2.08±0.52	0.56	0.72

чена композиционная мембрана с поверхностным слоем из АЦ. С помощью композиционной мембраны нанофильтрации НАЦ-3 и коммерческой ОПМН-П проведена очистка сточной воды. По результатам исследования коэффициент задержания поллютантов из сточных вод с помощью мембраны НАЦ-3 и ОПМН-П составила 0.68 и 0.64, соответственно. Проницаемость мембран нейлон-АЦ3 и ОПМН-П по сточной воде составила соответственно 0.074 и 0.064 дм³/м²·с·КПа при давлении 0.65 МПа, что в 3 раза ниже, чем производительность мембран по дистиллированной воде. Выявлена высокая селективность мембраны НАЦ-3 по отношению к ионам NO₃⁻>PO₄³⁻>SO₄²⁻, коэффициент задержания по которым более 0.93. Коэффициент задержания ионов тяжелых металлов Pb²⁺>Fe³⁺>Cd²⁺ составляет 0.75.

Таким образом, на основании проведенных исследований по очистке сточных вод, композиционная мембрана НАЦ-3 обладает высокой селективностью в отношении многовалентных

ионов и высоким коэффициентом задержания по показателю ХПК, не уступающих коммерческой мембране нанофильтрации. На практике возможно использование композиционной мембраны для доочистки сточных вод после первичных методов очистки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список источников/ References

1. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Fazullina L.I., Nasyrov I.A., *Helix*, 2019, Vol. 9 (5), pp. 5563-5567.
2. Li Y., Xiong S., Tang X.Y., Wu H. et al., *Journal of environmental chemical engineering*, 2021, Vol. 9 (6), Article number 106371. doi: 10.1016/j.jece.2021.106371.



3. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Salakhova A.N., *Membranes and Membrane Technologies*, 2020, Vol. 2, No 2, pp. 115-124. doi: 10.1134/S2517751620020067.
4. Kong F.-X., Wang Y.-K., Cao J.-M., Sun G.-D. et al., *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2021, Vol. 7 (12), pp. 2390-2396. doi: 10.1039/d1ew00523e.
5. Mohammad A.W., Hilal N., Pei L.Y., *International Journal Of Green Energy*, 2004, Vol. 1 (2), pp. 251-263. doi: 10.1081/GE-120038756
6. Almeida R., Couto J.M.D., Gouvea R.M., Oroski F.D. et al., *Waste Management & Research*, 2020, Vol. 38 (10), pp. 251-263. doi: 10.1177/0734242X20933333.
7. Matosic M., Terzic S., Jakopovic H.K., Mijatovic I. et al., *Water Science And Technology*, 2008, Vol. 58 (3), pp. 597-602. doi: 10.2166/wst.2008.700.
8. Smol M., Wlodarczyk-Makula M., Skowron-Grabowska B., *Desalination And Water Treatment*, 2017, Vol. 69, pp. 335-343. doi: 10.5004/dwt.2017.20241.
9. Wu Y., Yao R., Zhang X., *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, Vol. 9, Issue 3, pp. 105164. doi:10.1016/j.jece.2021.105164.
10. Hezarjaribi M., Bakeri G., Sillanpaa M., Chaichi M.J. et al., *Journal of Environmental Management*, 2021, Vol. 284, pp. 111996. doi:10.1016/j.jenvman.2021.111996.
11. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O. et al., *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, Vol. 12. (5), pp. 1229-1235. doi: 10.1134/S2075113321050105.
12. Volkov A.O., Golubenko D.V., Yaroslavtsev A.B., *Separation and Purification Technology*, 2021, Vol. 254, Article Number: 117562. doi:10.1016/j.seppur.2020.117562
13. Alvarenga A.D., Correa D.S., *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 285, pp. 125376. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125376.
14. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., *Membranes and Membrane Technologies*, 2021, Vol. 3 (2), pp. 107-113. doi: 10.1134/S2517751621020049.
15. Park S.Y., Chung J.W., Kwak S.Y., *Journal of membrane science*, 2015, Vol. 491, pp. 1-9. doi:10.1016/j.memsci.2015.05.007.

Информации об авторах / Information about the authors

Д.Д. Фазуллин – к.т.н., доцент Набережночелнинского института КФУ, Набережные Челны

Г.В. Маврин – к.х.н., доцент Набережночелнинского института КФУ, Набережные Челны

D.D. Fazullin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, E-mail: denr3@yandex.ru

G.V. Mavrin – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, E-mail: mavrin-g@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена после рецензирования 09.02.2022; принята к публикации 10.02.2022.

The article was submitted 08.12.2021; approved after reviewing 09.02.2022; accepted for publication 10.02.2022.