А.Г. Первов, Т.Н. Ширкова (Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Российская Федерация)

СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДОВ КОНЦЕНТРАТОВ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Alexei G. Pervov, Tatiana N. Shirkova (Moscow State University
of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation)

REDUCTION OF CONCENTRATE EFFLUENTS OF REVERSE OSMOSIS UNITS USED FOR TREATMENT OF WASTE WATER CONTAINING ORGANIC POLLUTION

Введение

Установки электрообессоливания нефти, другие химические производства, а также полигоны хранения твердых коммунальных отходов (ТКО) являются источниками загрязнения подземных и поверхностных вод токсичными продуктами разложения органических веществ. Возможность очистки фильтрата ТКО до уровня современных требований, предъявляемых к очищенной воде, поступающей в водоемы рыбохозяйственного назначения, представляет сложную техническую задачу. Наиболее эффективной технологией очистки фильтратов ТКО в настоящее время признана технология обратного осмоса, позволяющая эффективно удалять из воды не только загрязнения в ионной форме (аммоний), но и растворенные органические соединения, определяемые показателем химического потребления кислорода.

Background

Units for electrical desalination of oil, other chemical industries, as well as landfills for the storage of municipal solid waste (MSW) are sources of groundwater and surface water pollution with toxic decomposition products of organic substances. The ability to purify MSW filtrate to the level of modern requirements for purified water supplied to fishery reservoirs is a complex technical problem. The most effective technology for purifying solid waste filtrates is currently recognized as reverse osmosis technology, which allows to effectively remove from water not only contaminants in the ionic form (ammonium), but also dissolved organic compounds determined by the indicator of chemical oxygen consumption.

Серьезную проблему при использовании технологии обратного осмоса представляет образование концентратов и их утилизация.

Расходы концентратов при обработке фильтратов полигонов ТКО методом обратного осмоса составляют от 20 % до 30 % от всей поступающей на обработку воды.

Цели и задачи

Цель работы - изучение вопросов обработки минерализованных стоков, содержащих нефтепродукты и другие органические загрязнения (стоков электрообессоливающих установок, фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов) с применением методов обратного осмоса и нанофильтрации.

Результаты

Отмечено, что серьезную экологическую проблему создают концентраты установок обратного осмоса, которые имеют высокие содержания солей и органических веществ и которые трудно утилизировать.

Предложено использовать разделение концентратов на растворы, содержащие их компоненты, в зависимости от значения величины их задержания с помощью нанофильтрационных мембран.

Так, концентраты установок обратного осмоса можно разделить на растворы с высоким содержанием органических веществ и солевые растворы (содержащие соли аммония), объемы которых в 10-20 раз ниже, чем объемы концентратов.

На примере концентратов установок обратного осмоса показано, как можно разделить многокомпонентные растворы на высококонцентрированные растворы органических веществ и солевые растворы хлорида аммония с целью упростить их дальнейшую утилизацию.

Описана технология разделения растворов, использующая разбавление концентрата деионизованной водой, что позволяет добиться разделения растворов на компоненты в зависимости от их селективности - степени их задержания нанофильтрационными мембранами.

A serious problem when using reverse osmosis technology is the formation of concentrates and their disposal.

The consumption of concentrates in the treatment of leachate from MSW landfills by the reverse osmosis method is from 20 % to 30 % of all incoming water for treatment.

Aims and Objectives

The purpose of this work is to study the issues of processing mineralized wastewater containing oil products and other organic pollution (wastewater from electrical desalting plants, leachate from solid municipal waste storage sites) using reverse osmosis and nanofiltration methods.

Results

It is noted that a serious environmental problem is posed by reverse osmosis concentrates, which have a high content of salts and organic substances and are difficult to dispose of.

It is proposed to use the separation of concentrates into solutions containing their components, depending on the value of the value of their retention using nanofiltration membranes.

So, concentrates of reverse osmosis plants can be divided into solutions with a high content of organic substances and saline solutions (containing ammonium salts), the volumes of which are 10-20 times lower than the volumes of concentrates.

Using the example of concentrates from reverse osmosis plants, it is shown how multi-component solutions can be divided into highly concentrated solutions of organic substances and saline solutions of ammonium chloride in order to simplify their further disposal.

The technology of separation of solutions is described, using dilution of the concentrate with deionized water, which makes it possible to achieve separation of solutions into components depending on their selectivity - the degree of their retention by nanofiltration membranes..

Ключевые слова: обратный осмос; нанофильтрация; обработка и утилизация концентратов обратноосмотических установок; селективность мембран; очистка стоков установок электрообессоливания; обработка фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов; разделение многокомпонентных растворов; удаление аммония; удаление из воды органических веществ; очистка иловых вод после обезвоживания осадков

Keywords: reverse osmosis; nanofiltration; reverse osmosis concentrate handling and utilization; membrane rejection; reject water after wastewater sludge dewatering; treatment of electric desalting plant wastewater; treatment of landfill leachates for storage of municipal solid waste; separation of multicomponent solutions; reduction of ammonia; removal of organics from water; treatment of reject water after wastewater sludge dewatering

Введение

Установки электрообессоливания нефти (ЭЛОУ), другие химические производства, а также полигоны хранения твердых коммунальных отходов (ТКО) являются источниками загрязнения подземных и поверхностных вод токсичными продуктами разложения органических веществ [1, 2]. Возможность очистки фильтрата ТКО до уровня современных требований, предъявляемых к очищенной воде, поступающей в водоемы рыбохозяйственного назначения, представляет сложную техническую задачу [3-6].

Наиболее эффективной технологией очистки фильтратов ТБО в настоящее время признана технология обратного осмоса, позволяющая эффективно удалять из воды не только загрязнения в ионной форме (аммоний), но и растворенные органические соединения, определяемые показателем химического потребления кислорода (ХПК) [7-10].

Серьезную проблему при использовании технологии обратного осмоса представляет образование концентратов и их утилизация [11, 12]. Расходы концентратов при обработке фильтратов полигонов ТКО методом обратного осмоса составляют от 20 % до 30 % от всей поступающей на обработку воды.

Сточные воды установок ЭЛОУ, фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов и других производств с применением метода обратного осмоса - концен-

траты установок обратного осмоса - имеют значения ХПК порядка 6000 мг/л и общего содержания порядка 10000 мг/л, что делает практически невозможным дальнейшую их обработку и концентрирование методом обратного осмоса вследствие высокого осмотического давления этих растворов. В практике использования обратного осмоса при очистке фильтратов полигонов ТКО концентрат возвращают в «тело» полигона [1, 5].

Традиционно в схемах очистки сточных вод [5] с применением метода обратного осмоса не удается достичь расхода концентрата менее чем 30-33 % от расхода обрабатываемой воды (рисунок 1).

Для обработки концентратов установок обратного осмоса используется технология «нулевого сброса» («Zero Liquid Discharge» или ZLD), состоящая в упаривании концентрата «досуха» [5].

Высокие затраты при применении такой технологии вызваны не только высоким энергопотреблением, но и необходимостью предварительного полного удаления из концентрата солей жесткости с применением реагентных методов умягчения [7, 8].

В ряде работ описывается обработка концентратов с применением нанофильтрационных мембран [5, 6, 9] для снижения концентраций ионов кальция и магния и для облегчения его дальнейшей обработки и концентрирования методом обратного осмоса [10-12]. Кроме того, эффективность процесса выпаривания «досуха» падает при содержа-

нии в выпариваемых концентратах органических веществ, препятствующих кристаллизации.

В последнее время в мировой практике применения систем обратного осмоса для концентрирования минерализованных стоков и доведения их концентраций до значений 200-240 г/л используются низкоселективные мембраны обратного осмоса и нанофльтра-

ции [13]. При этом процесс ведется при низких давлениях, что делает его энергетически более выгодным, чем процесс выпаривания [12, 13].

Принципы применения нанофльтрационных мембран для концентрирования растворов представлены на рисунке 2 и изложены в ряде публикаций [12-14].

- 1 - бак исходного фильтрата; 2 - подающий насос; 3 - механический фильтр;
- 4 - бак осветленного фильтрата после удаления взвеси; 5 - «бустерный» насос;
- 6 - дисковый микрофильтр; 7 - рабочий насос первой ступени высокого давления;
- 8 - мембранный аппарат первой ступени с высоконапорными мембранами обратного осмоса; 9 - регулирующий вентиль давления первой ступени;
- 10 - бак сбора пермеата первой ступени; 11 - рабочий насос второй ступени;
- 12 - аппарат второй ступени с мембранами низкого давления;
- 13 - регулирующий вентиль давления второй ступени;
- 14 - бак сбора пермеата третьей ступени; 15 - рабочий насос третьей ступени;
- 16 - аппарат третьей ступени с мембранами низкого давления;
- 17 - регулирующий давление вентиль третьей ступени;
- 18 - аппарат-концентратор снижения расхода концентрата первой ступени;
- 19 - бак сбора концентрата первой ступени;
- 20 - рабочий насос аппаратов установки утилизации концентрата первой ступени;
- 21 - регулирующий давление вентиль ступени утилизации концентрата

Рисунок 1. Схема с применением мембран высокого давления на I ступени

а)

б)

- 1 - рабочий насос установки обратного осмоса; 2 - обратноосмотический аппарат;
 3 - регулирующий давление вентиль; 4 - приемный бак концентрата;
 5 - рабочий насос установки нанофильтрации;
 6 - нанофильтрационные аппараты-концентраторы первой, второй и третьей ступеней

Рисунок 2. Принципиальные балансовые схемы обработки стоков с применением установок обратного осмоса (а) и дальнейшего сокращения расходов концентратов с применением низконапорных нанофильтрационных мембран при давлении 0,6-1,6 МПа (б)

Высокие значения концентраций солей и органических веществ в концентрате достигаются при низких значениях величин рабочих давлений [13, 15].

Это связано с тем, что движущей силой процесса концентрирования с применением метода обратного осмоса является разница между величинами осмотических давлений концентрата и пермеата [16].

Присутствие органических веществ в концентратах повышает значение осмотического давления и затрудняет перенос воды через мембраны, снижая величину удельной производительности мембран [9-11, 14]. Представляет интерес разделить многокомпонентные растворы на компоненты: например, при обработке стоков полигонов ТКО отделить органические вещества от неорганических солей, например, солей аммония [17, 18].

При проведении работ по очистке и концентрированию стоков давно замечено [2, 8-10], что при использовании низконапорных обратноосмотических мембран селективности по различным загрязнениям сильно отличаются, особенно в процессе проведения экспериментов в циркуляционном режиме при высоких значениях коэффициентов снижения объема [2].

В настоящей работе разработан и применен новый технологический «прием», позволяющий провести отделение органики от растворенных в воде ионов и получить высококонцентрированные растворы, используя только мембраны обратного осмоса.

Разбавляя концентрат деионизованной водой и опять концентрируя его, мы достигаем изменения соотношений концентраций ионов с разной селективностью, в результате получая в концентрате вещества, хорошо задерживаемые мембранами, а в пермеате – ионы, плохо задерживаемые мембранами.

Можно разделить концентрат на раствор органических веществ с низким солесодержанием и концентрированный раствор солей аммония с величиной общего солесодержания 80000 мг/л. При этом суммарный объем концентрированных растворов составит менее 5 % от существующего расхода концентрата.

Экспериментальная программа

Программа экспериментов состояла в разделении стоков, содержащих органические вещества и минеральные соли. Использовался концентрат установки, полученный на полигоне ТКО «Кучино» в Московской области. Величина общего солесодержания концентрата составляла 5000 мг/л, значение ХПК составляло порядка 2000 мг/л.

Эксперименты проведены в 4 этапа:

- *первый этап:* снижение объема исходного раствора в 5 раз с применением нанофильтрационных мембран;

- *второй этап:* разбавление концентрата деминерализованной водой в соотношении 4 : 1. Для разбавления стоков использовалась деминерализованная вода, полученная при обработке подземной воды с применением низконапорных обратноосмотических мембран;

- *третий этап:* разбавления концентрата, полученного на втором этапе, деминерализованной водой (до объема 15 л), с последующим его концентрированием с применением нанофильтрационных мембран с получением пермеата (15 л) и концентрата (3 л);

- на *четвертом этапе* пермеаты нанофильтрационных мембран обрабатывались с применением обратноосмотических мембран для получения деминерализованной воды и концентрата, при этом значение величины коэффициента снижения объема в эксперименте (отношения объема исходной воды к объему концентрата в конце эксперимента) составляло 10-12.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3. Исходная вода помещалась в бак 1, откуда насосом 2 подавалась в аппарат с нанофильтрационными мембранами. Объем исходной воды в баке 1 составлял 15 л. Концентрат после обработки возвращался обратно в бак 1, а пермеат собирался в бак 3. После завершения цикла пермеат обрабатывался с применением обратноосмотической мембраны.

Концентрат возвращался в бак 3, а пермеат собирался в бак 5. После завершения цикла в бак 1 добавлялась деминерализованная вода (с величиной удельной элек-

тропроводности 15-35 мксм/см) и цикл повторялся. Использовались мембранные элементы модели NE70-1812-100 с нанофильтрационными мембранами 70 NE производства фирмы CSM (Корея).

Для производства деминерализованной воды и обработки пермеата использовались мембранные элементы RE 2012-100 с обратноосмотическими низконапорными мембранами типа BLN производства компании CSM.

Для создания рабочего давления использовались насосы модели «RO 900-220» (русской фирмы «Райфил») с подачей 80 л/ч и напором 7 бар. Площадь мембран в каждом мембранном элементе модели 1812 составляла 0,5 м².

Определения значений ХПК производилось титриметрическим методом.

Для определения общего содержания органических веществ также использовался метод спектрофотометрии. Использовался спектрометр атомно-абсорбционный А-2.

Концентрации ионов кальция и магния определялись трилонометрически. Концентрации ионов жесткости, хлорид-ионов, а также щелочность определялись титриметрическим методом. Концентрации сульфатов - с применением турбидиметрического метода анализа.

Концентрации ионов аммония определялись с помощью фотометрического метода, использовался фотометр фотоэлектрический КФК.

Концентрации ионов натрия определялись атомно-адсорбционным методом, а определение сухого остатка производилось весовым методом анализа.

- 1 - патронный фильтр предварительной очистки; 2 - бак исходной воды;
- 3 - рабочий насос первой ступени; 4 - нанофильтрационный мембранный аппарат;
- 5 - регулирующий давление вентиль; 6 - бак сбора пермеата первой ступени;
- 7 - рабочий насос второй ступени;
- 8 - аппарат с обратноосмотическими мембранами низкого давления второй ступени;
- 9 - бак сбора пермеата второй ступени; 10 - манометр; 11 - вентиль

Рисунок 3. Схема экспериментальной установки

Обсуждение результатов

На рисунках 4 и 5 представлены результаты определений значений ХПК, ионов кальция и аммония в концентрате установки при проведении первого этапа эксперимента - при концентрировании раствора концентрата установки фильтрата ТКО.

Представлены зависимости значений ХПК, концентраций, аммония, кальция от значения коэффициента снижения объема K на каждом из трех этапов обработки (после разбавления и последующего концентрирования).

Как видно из рисунка 4, по мере разбавления концентрата увеличиваются эффективность концентрирования и возможность снижения объема с увеличением значения коэффициента K .

На рисунке 5 показаны зависимости снижения удельной производительности мембран при обработке концентрата и при обработке концентрата после разбавления. После разбавления процесс концентрирования раствора органических веществ идет намного эффективнее, что позволяет увеличить значение ХПК концентрата с 5000 до 40000, снизив его расход в 20 раз. Пермеат после проведения процессов разбавления и последующего концентрирования может быть также обработан с получением высококонцентрированных растворов солей натрия и аммония с величиной солесодержания до 80000 мг/л (в соответствии с рисунком 1) и

деминерализованной воды, используемой для разбавления.

На рисунке 6 представлены результаты спектрального анализа проб концентрата установки обратного осмоса, концентратов после разбавления и последующего концентрирования. На графиках (рисунок 6) показаны зависимости величин светопоглощения воды от длины волны света, пропускаемого через пробу воды. Изменение величины оптической плотности в различных частях спектра позволяют сделать вывод о значениях молекулярного веса органических веществ, содержащихся в воде.

На рисунке 7 показано снижение производительности по пермеату мембранного элемента NE70-1812-100 с ростом значения коэффициента K .

На рисунке 8 показаны зависимости концентраций ионов солей, содержащихся в пермеате после третьего цикла эксперимента, от значения коэффициента K , которое может достигать до 100.

Таким образом, концентрат обратноосмотической установки объемом 15 л разделяется на объем концентрата органики - 0,7 л, объем концентрата солей аммония - 1,0 л и объем очищенной деминерализованной воды - 13,3 л.

Обобщающие графики проведения процесса разделения раствора и концентрирования органических веществ с применением разбавления показаны на рисунке 9.

Рисунок 4. Зависимости концентраций различных растворенных в воде веществ в концентрате и пермеате установки нанофильтрации от значения коэффициента снижения объема K

1, 3, 5 - аммоний;
2, 4, 6 - хлориды;
7, 8, 9 - ХПК соответственно в концентрате при обработке исходного концентрата установки обратного осмоса, в концентрате при обработке полученного концентрата, после его разбавления в 10 раз и в пермеате

1, 2 и 5 соответственно аммоний, ХПК и хлориды при обработке исходного концентрата;
3, 4 и 6 соответственно хлориды, ХПК и аммоний в концентрате после разбавления
и повторной обработки

Рисунок 5. Изменение концентраций ионов аммония, хлорид-ионов и значений ХПК в зависимости от величины коэффициента К при обработке исходного концентрата и после разбавления в 10 раз и повторной обработки на первой ступени с применением нанофильтрационных мембран

1 - в исходном концентрате;
2 - в концентрате после разбавления концентрата в 10 раз перед началом второго цикла;
3 - в конце второго цикла после сокращения объема в 20 раз;
4 - в пермеате после обработки концентрата;
5 - в пермеате после второго цикла

Рисунок 6. Изменение оптической плотности воды в зависимости от длины волны пропускаемого через пробу света

Производительность
мембранного аппарата, л/ч

1 - при обработке исходного концентрата;
2 - при повторной обработке концентрата после разбавления в 10 раз

Рисунок 7. Снижение производительности по пермеату мембранного элемента NE70-1812-100 с ростом значения коэффициента К

1 - хлориды; 2 - аммоний; 3 - ХПК; 4 - кальций

Рисунок 8. Зависимости концентраций ионов кальция, аммония, хлорид-ионов и значений ХПК в концентратах обратноосмотических мембран ($K = 1 - 10$) и нанофильтрационных мембран ($K = 10 - 80$) при обработке и концентрировании пермеата нанофильтрационных мембран после первой ступени эксперимента с целью сокращения его объема

1 - ХПК; 2 - аммоний; 3 - хлориды

Рисунок 9. Зависимость значений концентраций ХПК, хлоридов аммония от значения коэффициента снижения объема К (отношения исходного объема концентрата к объему концентрата в конце эксперимента)

Практическое применение результатов

Более подробный расчет, основы которого изложены в [1, 2], планируется сделать в следующих работах. Очевидно, что разбавление и дополнительные циклы концентрирования не значительно увеличивает затраты, поскольку производительность мембран значительно выше после разбавления.

Применение нанофильтрационных мембран существенно упрощает процесс и снижает эксплуатационные затраты [6]. Так, при обработке фильтрата ТКО даже для достижения величины снижения объема в три раза используются мембраны высокого давления, работающие под давлением в 5–6 МПа [1, 4, 5], при этом для достижения заданной

величины выхода по пермеату производительность мембран падает в 3–4 раза, и общее количество мембран значительно превышает количество мембран при использовании схемы с нанофильтрацией на первой ступени [1, 2].

На рисунке 10 показана упрощенная схема установки по сокращению расходов концентратов и минерализованных стоков с указанием их расходов, позволяющая разделить стоки на деионизованную воду и концентраты различных компонентов воды, поразному задерживающихся нанофильтрационными мембранами.

В зависимости от состава стоков и назначения технологии очистки воды могут быть решены проблемы утилизации стоков.

Так, концентраты установок очистки фильтратов полигонов ТКО разделяются на раствор органических веществ с низкой величиной общего солесодержания и высоким (до 50000 мг/л) значением ХПК и концентрированный раствор солей аммония. Раствор органики может быть добавлен в сточную воду, посту-

пающую на биологическую очистку [19], а раствор солей аммония может быть использован при производстве аммонийных удобрений [20]. В дальнейших исследованиях планируется выделить также концентрированный раствор токсичных тяжелых металлов для отдельной утилизации.

- 1 - приемный резервуар стока и воды для разбавления первого цикла;
- 2 - рабочий насос первой ступени;
- 3 - мембранный аппарат первой ступени с нанофильтрационными мембранами;
- 4 - бак сбора концентрата первой ступени и разбавления второго цикла;
- 5 - насос подачи на аппарат нанофильтрации второго цикла концентрирования;
- 6 - нанофильтрационный аппарат второго цикла концентрирования;
- 7 - бак сбора пермеата нанофильтрационных аппаратов 3 и 6;
- 8 - рабочий насос установки сокращения объема пермеата;
- 9 - обратноосмотический аппарат сокращения расхода пермеата;
- 10 - нанофильтрационный аппарат сокращения расхода пермеата;
- 11 - бак сбора пермеата после его концентрирования;
- 12 - бак сбора пермеата аппаратов с обратноосмотическими мембранами;
- 13 - насос подачи пермеата на разбавление; 14 - вентиль

Рисунок 10. Схема разделения минерализованных стоков с применением методов нанофильтрации и обратного осмоса с указанием расходов

Выводы

1. Экспериментально проработан метод разделения водных многокомпонентных растворов солей и органических веществ на высококонцентрированные растворы органических веществ и солевые растворы путем разбавления многокомпонентного раствора деионизованной водой и концентрирования его с применением нанофильтрационных мембран с низкой селективностью.

2. Благодаря отделению содержащихся в раствора ионов солей от органических веществ оказывается возможным многократно сконцентрировать полученные растворы с целью их утилизации, при этом суммарный объем полученных растворов при одинаковых затратах оказывается в 4-5 раз ниже, чем объем концентрата, полученного путем обработки исходного раствора методом обратного осмоса.

Список литературы

1. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov K.V. Design of Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Techniques to Treat Landfill Leachates and Increase Recoveries // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. Issue 5.
2. Pervov A., Tikhonov K., Dabrowski W. Application of Reverse Osmosis to Treat High Ammonia Concentrated Reject from Sewage Sludge Digestion // *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 110. P. 1-9. DOI: 10.5004/dwt.2018.22009.
3. Pervov A.G., Andrianov A.P., Efremov R.V., Golovesov V.A. New Technique for Reducing Reverse Osmosis Concentrate Discharge // *Membranes and Membrane Technologies*. 2021. Vol. 3. Issue 3. P.178-185. DOI: 10.1134/S2517751621030070.
4. Keyikoglu R., Karatas O., Rezanian H., Kobya M., Vatanpour V., Khataee A. A Review on Treatment of Membrane Concentrates Generated from Landfill Leachate Treatment Processes // *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 259. Article Number 118182. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118182.
5. Di Palma L., Ferrantelli P., Merli C., Petrucci E. Treatment of Industrial Landfill Leachate by Means of Evaporation and Reverse Osmosis // *Waste Management*. 2002. Vol. 22. Issue 8. P. 951-955. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00079-X.
6. Ali M.E.A. Nanofiltration Process for Enhanced Treatment of RO Brine Discharge // *Membranes*. 2021. Vol. 11. Issue 3. P. 212. DOI: 10.3390/membranes11030212.
7. Van der Bruggen B., Koninckx A., Vandecasteele C. Separation of Monovalent and Divalent Ions from Aqueous Solution by Electrodialysis and Nanofiltration // *Water Research*. 2004. Vol. 38. Issue 5. P. 1347-1353. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.008.
8. Yang Fengrui, Wang Zhi, Yan Fanglei, Wang Jixiao. Progress in Separation of Monovalent/Divalent Inorganic Salt Solutions by Nanofiltration // *CIESC Journal*. 2021. Vol. 72. Issue 2. P. 799-813. DOI: 10.11949/0438-1157.20200570.
9. Marchetti P., Solomon M.F.J., Szekely G., Livingston A. Molecular Separation with Organic Solvent Nanofiltration: A Critical Review // *Chemical Reviews*.

References

1. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov K.V. Design of Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Techniques to Treat Landfill Leachates and Increase Recoveries. *Membranes and Membrane Technologies*, 2020, Vol. 2, Issue 5.
2. Pervov A., Tikhonov K., Dabrowski W. Application of Reverse Osmosis to Treat High Ammonia Concentrated Reject from Sewage Sludge Digestion. *Desalination and Water Treatment*, 2018, Vol. 110, pp. 1-9. DOI: 10.5004/dwt.2018.22009.
3. Pervov A.G., Andrianov A.P., Efremov R.V., Golovesov V.A. New Technique for Reducing Reverse Osmosis Concentrate Discharge. *Membranes and Membrane Technologies*, 2021, Vol. 3, Issue 3, pp.178-185. DOI: 10.1134/S2517751621030070.
4. Keyikoglu R., Karatas O., Rezanian H., Kobya M., Vatanpour V., Khataee A. A Review on Treatment of Membrane Concentrates Generated from Landfill Leachate Treatment Processes. *Separation and Purification Technology*, 2021, Vol. 259, Article Number 118182. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118182.
5. Di Palma L., Ferrantelli P., Merli C., Petrucci E. Treatment of Industrial Landfill Leachate by Means of Evaporation and Reverse Osmosis. *Waste Management*, 2002, Vol. 22, Issue 8, pp. 951-955. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00079-X.
6. Ali M.E.A. Nanofiltration Process for Enhanced Treatment of RO Brine Discharge. *Membranes*, 2021, Vol. 11, Issue 3, pp. 212. DOI: 10.3390/membranes11030212.
7. Van der Bruggen B., Koninckx A., Vandecasteele C. Separation of Monovalent and Divalent Ions from Aqueous Solution by Electrodialysis and Nanofiltration. *Water Research*, 2004, Vol. 38, Issue 5, pp. 1347-1353. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.008.
8. Yang Fengrui, Wang Zhi, Yan Fanglei, Wang Jixiao. Progress in Separation of Monovalent/Divalent Inorganic Salt Solutions by Nanofiltration. *CIESC Journal*, 2021, Vol. 72, Issue 2, pp. 799-813. DOI: 10.11949/0438-1157.20200570.
9. Marchetti P., Solomon M.F.J., Szekely G., Livingston A. Molecular Separation with Organic Solvent Nanofiltration: A Critical Review. *Chemical Reviews*,

2014. Vol. 114, Issue 21. P. 10735-10806. DOI: 10.1021/cr500006j.

10. Van Linden N., Shang R., Stockinger G., Heijman B., Spanjers H. Separation of Natural Organic Matter and Sodium Chloride for Salt Recovery Purposes in Zero Liquid Discharge // *Water Resources and Industry*. 2020. Vol. 23. Article Number 100117. DOI: 10.1016/j.wri.2019.100117.

11. Zhang Y., Van Bruggen B., Pinoy L., Meesschaert B. Separation of Nutrient Ions and Organic Compounds from Salts in RO Concentrator by Standard and Monovalent Selective Ionexchange Membranes Used in Electrodialysis // *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 332, Issues 1-2. P. 104-112. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.01.030.

12. Talaeipour M., Nouri J., Hassani A.H., Mahvi A.H. An Investigation of Desalination by Nanofiltration, Reverse Osmosis and Integrated (Hybrid NF/RO) Membranes Employed in Brackish Water Treatment // *Journal of Environmental Health Science Engineering*. 2017. Vol. 15. Article Number 1. DOI: 10.1186/s40201-017-0279-x.

13. Wang Z., Deshmukh A., Du Y., Elimelech M. Minimal and Zero Liquid Discharge with Reverse Osmosis Using Low-Salt-Rejection Membranes // *Water Research*. 2020. Vol. 170. Article Number 115317. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115317.

14. Ayoub G.M., Korban L., Al-Hindi M., Zayyat R. Removal of Fouling Species from Brackish Water Reverse Osmosis Reject Stream // *Environmental Technologies*. 2018. Vol. 39, Issue 6. P. 804-813. DOI: 10.1080/09593330.2017.1311946.

15. Tularam G.A., Ilahee M. Environmental Concerns of Desalinating Seawater Using Reverse Osmosis // *Journal of Environmental Monitoring*. 2007. Vol. 9, Issue 8. P. 805-813. DOI: 10.1039/B708455M.

16. Bartolomew T.V., Mey L., Arena J.T., Siefert N.S. Osmotically Assisted Reverse Osmosis for high Salinity Brine Treatment // *Desalination*. 2017. Vol. 421. P. 3-11. DOI: 10.1016/j.desal.2017.04.012.

17. Peters T.A. Purification of Landfill Leachate by Reverse Osmosis and Nanofiltration // *Desalination*. 1998. Vol. 119. P. 289-293.

18. Mariam T., Nghiem L.D. Landfill leachate Treatment Using Hybrid Coagulation-Nanofiltration Processes // *Desalination*. 2010. Vol. 250. P. 677 - 681.

19. Cwikla J., Konieczny K. Treatment of Sludge Water with Reverse Osmosis // *Environment Protection Engineering*. 2011. Vol. 37, Issue 4. P. 21-34.

20. Shahalam A., Al-Rashidi H., Abusam A. Treatment of Concentrated Nutrients in Reject Wastewater of Reverse Osmosis Process Treating Tertiary Effluent from Conventional Biological Treatment of Municipal Wastewater // *International Journal of Arts and Sciences*. 2010. Vol. 3, Issue 9. Article Number 258273.

2014. Vol. 114, Issue 21, pp. 10735-10806. DOI: 10.1021/cr500006j.

10. Van Linden N., Shang R., Stockinger G., Heijman B., Spanjers H. Separation of Natural Organic Matter and Sodium Chloride for Salt Recovery Purposes in Zero Liquid Discharge. *Water Resources and Industry*, 2020, Vol. 23, Article Number 100117. DOI: 10.1016/j.wri.2019.100117.

11. Zhang Y., Van Bruggen B., Pinoy L., Meesschaert B. Separation of Nutrient Ions and Organic Compounds from Salts in RO Concentrator by Standard and Monovalent Selective Ionexchange Membranes Used in Electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 2009, Vol. 332, Issues 1-2, pp. 104-112. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.01.030.

12. Talaeipour M., Nouri J., Hassani A.H., Mahvi A.H. An Investigation of Desalination by Nanofiltration, Reverse Osmosis and Integrated (Hybrid NF/RO) Membranes Employed in Brackish Water Treatment. *Journal of Environmental Health Science Engineering*, 2017, Vol. 15, Article Number 1. DOI: 10.1186/s40201-017-0279-x.

13. Wang Z., Deshmukh A., Du Y., Elimelech M. Minimal and Zero Liquid Discharge with Reverse Osmosis Using Low-Salt-Rejection Membranes. *Water Research*, 2020, Vol. 170, Article Number 115317. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115317.

14. Ayoub G.M., Korban L., Al-Hindi M., Zayyat R. Removal of Fouling Species from Brackish Water Reverse Osmosis Reject Stream. *Environmental Technologies*, 2018, Vol. 39, Issue 6, pp. 804-813. DOI: 10.1080/09593330.2017.1311946.

15. Tularam G.A., Ilahee M. Environmental Concerns of Desalinating Seawater Using Reverse Osmosis. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, Vol. 9, Issue 8, pp. 805-813. DOI: 10.1039/B708455M.

16. Bartolomew T.V., Mey L., Arena J.T., Siefert N.S. Osmotically Assisted Reverse Osmosis for high Salinity Brine Treatment. *Desalination*, 2017, Vol. 421, pp. 3-11. DOI: 10.1016/j.desal.2017.04.012.

17. Peters T.A. Purification of Landfill Leachate by Reverse Osmosis and Nanofiltration. *Desalination*, 1998, Vol. 119, pp. 289-293.

18. Mariam T., Nghiem L.D. Landfill leachate Treatment Using Hybrid Coagulation-Nanofiltration Processes. *Desalination*, 2010, Vol. 250, pp. 677 - 681.

19. Cwikla J., Konieczny K. Treatment of Sludge Water with Reverse Osmosis. *Environment Protection Engineering*, 2011, Vol. 37, Issue 4, pp. 21-34.

20. Shahalam A., Al-Rashidi H., Abusam A. Treatment of Concentrated Nutrients in Reject Wastewater of Reverse Osmosis Process Treating Tertiary Effluent from Conventional Biological Treatment of Municipal Wastewater. *International Journal of Arts and Sciences*, 2010, Vol. 3, Issue 9, Article Number 258273.

Авторы

• Первов Алексей Германович, доктор
технических наук
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
Профессор кафедры водоснабжения
и водоотведения
Российская Федерация, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, 26
e-mail: ale-pervov@yandex.ru

• Ширкова Татьяна Николаевна
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
Аспирант кафедры водоснабжения
и водоотведения
Российская Федерация, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, 26
e-mail: info@mgsu.ru

The Authors

• Pervov Alexei G., Doctor of Engineering
Sciences
Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University)
Professor of Water Supply and Sanitation
Department
26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337,
Russian Federation
e-mail: ale-pervov@yandex.ru

• Shirkova Tatiana N.
Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University)
Postgraduate Student of Water Supply and Sanitation
Department
26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337,
Russian Federation
e-mail info@mgsu.ru