



УДК 628.32.66.081.63

doi: 10.55287/22275398\_2026\_60\_53

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРАТОВ ПОЛИГОНОВ ТКО: ПОДБОР МЕМБРАН И АППАРАТОВ, СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДОВ КОНЦЕНТРАТА

Т. Н. Ширкова \*

А. К. Стрелков \*\*

А. Г. Первов \*\*\*

\* Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

\*\* Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара

\*\*\* Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва

### Аннотация

Фильтрат полигонов хранения твердых коммунальных отходов (ТКО) — густая жидкость темного цвета, образующаяся в результате разложения и гниения твердых бытовых отходов на полигонах и их взаимодействия с атмосферными осадками. Помимо органических веществ и солей (солей аммония), фильтраты ТКО содержат токсичные химические соединения в концентрациях, превышающих установленные предельно допустимые значения концентраций (ПДК) для сброса в водоемы. Объемы образования фильтрата зависят от площади полигона, срока его работы, объема накопленных отходов, качества ежесуточной послойной пересыпки отходов, годового количества атмосферных осадков и сезона года.

### Ключевые слова

Обратный осмос, нанофильтрация, селективность мембран, низкоселективные мембраны, полигон хранения твердых коммунальных отходов, установка обратного осмоса, фильтрат, концентрат.

### Дата поступления в редакцию

07.09.2026

### Дата принятия к печати

11.09.2026

Фильтраты ТКО — сложные растворы с высоким солесодержанием до 10 000–15 000 мг/л, с ХПК также порядка 10–12 тыс. мг/л, с аммонием до 1500 мг/л. Для воды с таким высоким осмотическим давлением используют технологию опреснения морской воды: мембраны, работающие под давлением 50–60 бар. А чтобы достичь снижения аммония в 1000–3000 раз используют три ступени мембран, т. е. на первой ступени снижается солесодержание и органика в 30–50 раз, получается вода с содержанием солей 200–300 мг/л и аммония 20–30 мг/л, затем уже с применением мембран обратного осмоса при низких давлениях 16 бар снижается солесодержание до 20–30 мг/л и аммоний до 2–3 мг/л и на последней ступени обратного осмоса добиваются снижения аммония до величины 0,2–0,5 мг/л.

По этой схеме работают все установки Московской области. Ее называют «кайзеровская схема» по имени хозяина ЭКОКОН. Такой же схемой пользуется компания БМТ-сервис.

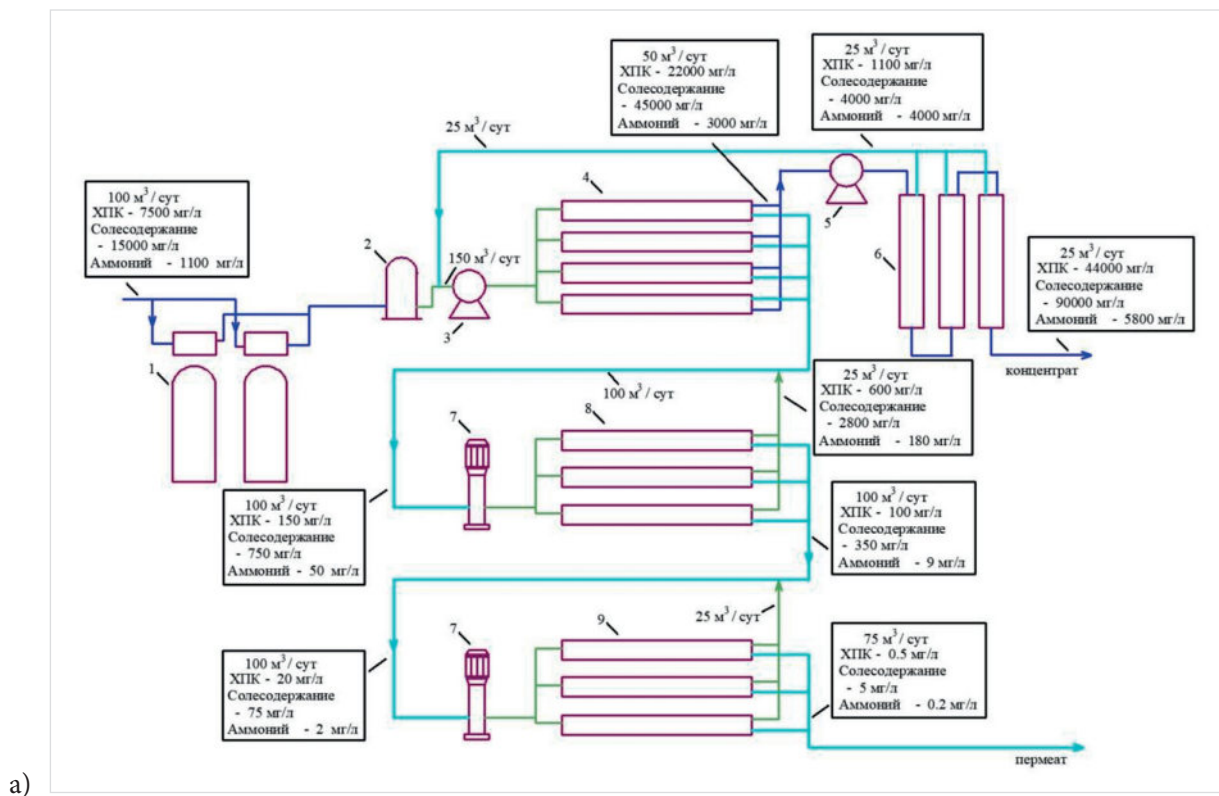
Но при опреснении морской воды при увеличении концентрации исходной воды в 3–3,5 раза мембраны теряют свою производительность из-за роста осмотического давления. Поэтому расход концентрата установки после обработки фильтрата ТКО составляет обычно не менее 30% от общего объема.

Разделение органики и солей крайне важно при утилизации концентратов установок обратного осмоса [1]. В настоящее время одним из наиболее доступных решений по утилизации концентратов является их выпаривание [2]. Присутствие органики мешает выпарить воду и добиться кристаллизации солей. Разделяя органику и соли, можно добиться большего эффекта сокращения объема концентрата за счет того, что органические растворы имеют в 4–5 раз меньшее значение осмотического давления, чем растворы электролитов с той же концентрацией. Разделение раствора на органический раствор и солевой раствор позволяют не только сократить объем концентрата, но и сократить расходы на его утилизацию.

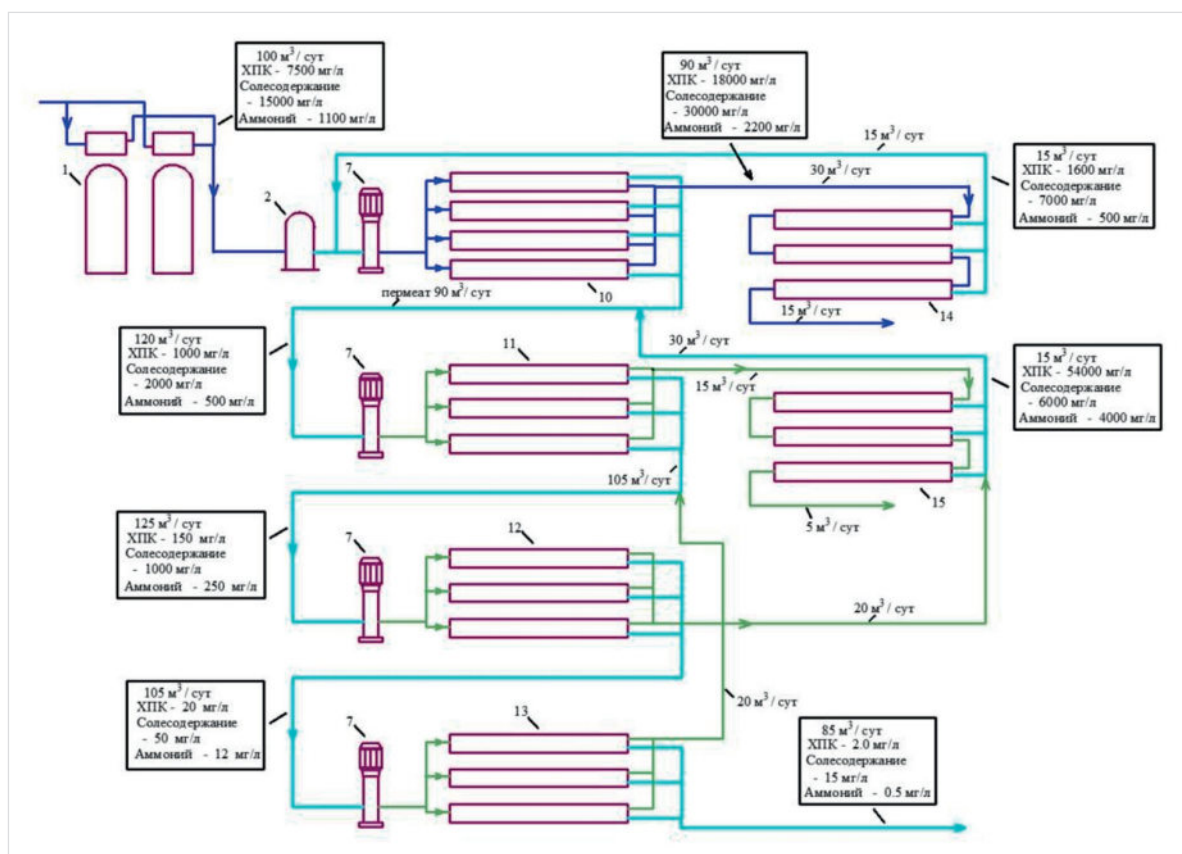
Концентрат, помимо солей, содержит растворенную органику, которая, вследствие увеличения осмотического давления, не дает возможности сократить расход концентрата и получить сухую соль при выпаривании.

Присутствие органических веществ в фильтрате полигонов ТКО создает основные проблемы, связанную с эффективностью очистки, высокими эксплуатационными затратами и высоким сбросным расходом концентрата, который сложно утилизировать.

На **рисунке 1(а)** показана известная и общепринятая в настоящее балансовая схема разделения фильтрата полигонов ТКО с использованием «морских» мембран высокого давления. Технология обработки фильтрата с использованием обратноосмотических мембран высокого давления на первой ступени и использованием мембранных аппаратов типа «фильтр-пресс», работающего под давлением до 15 МПа показана на **рисунке 1(б)**.



б)



**Рис. 1.** Технологические схемы обработки полигонов ТКО с получением очищенной воды и концентратов: **а)** схема с применением на первой ступени обратноосмотических мембран высокого давления, предназначенных для опреснения морской воды; **б)** схема с применением на первой ступени каскада низконапорных нанофильтрационных мембран для сокращения расхода концентрата и с применением низконапорных обратноосмотических мембран на второй ступени. 1 — механические фильтры предочистки; 2 — патронный или дисковый фильтр; 3 — насос высокого давления; 4 — аппарат первой ступени с мембранами высокого давления («морскими» мембранами); 5 — повысительный насос высокого давления; 6 — аппараты сверхвысокого давления; 7 — центробежный многоступенчатый насос для мембран обратного осмоса низкого давления и нанофильтрации; 8 — мембранные аппараты обратного осмоса низкого давления второй ступени; 9 — мембранные аппараты обратного осмоса низкого давления третьей ступени; 10 — мембранные аппараты с нанофильтрационными мембранами на первой ступени; 11 — мембранные аппараты с мембранами обратного осмоса низкого давления на второй ступени; 12 — мембранные аппараты обратного осмоса низкого давления на третьей ступени; 13 — мембранные аппараты обратного осмоса низкого давления на четвертой ступени; 14 — каскад нанофильтрационных аппаратов ступени для сокращения расхода концентрата на первой и второй ступенях

Как видно из **рисунка 1(а)**, такая схема позволяет получить расход концентрата не менее 30 процентов от расхода исходного фильтрата [1 – 7]. **Схема 1(а)** представляет собой «модернизированную» схему применения высоконапорных мембран с использованием дополнительных мембранных блоков высокого давления (например, аппаратов типа «фильтр-пресс» производства компании «ROCHEM» Германия) для снижения расхода концентрата при давлении 15 МПа. Схема на **рис. 1(б)** представляет технологию [8], позволяющую максимально сконцентрировать исходный фильтрат ТКО путем приме-

нения «каскада» из нанофильтрационных мембранных аппаратов с низкой селективностью по солям [8–13]. Однако высокое содержание органических веществ в концентратах первой и второй ступени не позволяет эффективно сократить объем концентрата и эффективно утилизировать концентрат путем его выпарки. Концентрат содержит органические вещества, которые препятствуют кристаллизации солей при выпарке, что не дает возможности получить сухую соль.

Примерные составы исследованных фильтратов ТКО представлены в *таблице 1*.

*Таблица 1*

**Исследованные составы полигонов ТКО**

| Показатели                        | ТКО<br>«Тимохово» |                     | ТКО<br>«Царево» |                     | ТКО<br>«Александров» |                      | ТКО<br>«Воскресенск» |         |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
|                                   | фильтрат          | пермеат<br>IV ступ. | фильтрат        | пермеат<br>IV ступ. | фильтрат             | пермеат<br>III ступ. | фильтрат             | пермеат |
| Взвешенные вещества, мг/л         | 220               | –                   | 180             | –                   | 329                  | –                    | 30                   | –       |
| Органические соединения ХПК, мг/л | 3 200             | 2,1                 | 1728            | 12                  | 4 387                | 2,4                  | 7 500                | 2       |
| БПК, мг/л                         | 925               | –                   | 800             | –                   | 2 690                | –                    | 3 500                | –       |
| Аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ), мг/л | 2 400             | 0,5                 | 425             | 0,45                | 380                  | 0,2                  | 1 100                | 0,5     |
| $\text{NO}_3^-$ , мг/л            | 59                | –                   | 65,5            | –                   | –                    | –                    | 85                   | –       |
| Щелочность, мг/л                  | 13 546            | –                   | 5 600           | 15                  | 760                  | –                    | 550                  | 0,2     |
| $\text{Cl}^-$ , мг/л              | 2 700             | 3,0                 | 728             | 2                   | 980                  | 10,0                 | 4450                 | 2       |
| $\text{SO}_4^-$ , мг/л            | 1 200             | –                   | 210             | 29                  | 86                   | 1,2                  | 4600                 | –       |
| Общая жесткость, мг-экв/л         | 20,0              | –                   | 15,5            | –                   | 5,5                  | –                    | 26                   | –       |
| pH                                | 8,9               | –                   | 8,9             | –                   | 7,7                  | –                    | 7,7                  | –       |
| $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , мг/л | 1 000             | –                   | 480             | –                   | –                    | –                    | 4400                 | –       |
| Фенолы                            | 0,2               | –                   | –               | –                   | –                    | –                    | 0,6                  | –       |
| Общее солесодержание, мг/л        | 9 000             | 2                   | 3 600           | 6                   | 3 580                | 65                   | 15 000               | 5       |
| Расход, м <sup>3</sup> /сут       | 1 000             | 950                 | 1 000           | 980                 | 1 000                | 900                  | 100                  | 97      |

Таким образом, разделяя органику и соли, можно раздельно добиться большего эффекта сокращения объема концентрата за счет того, что органические растворы имеют в 4–5 раз меньшее значение осмотического давления, чем растворы электролитов с той же концентрацией.

Разделение органики и солей крайне важно при утилизации концентратов установок обратного осмоса [1–7]. В настоящее время эффективным решением является выпаривание концентрата. Присутствие органики мешает выпарить воду и добиться кристаллизации солей. Поэтому в настоящее время концентрированный рассол после выпаривания используют в смеси с торфом или почвогрунтом на полигоне (*рис. 2*). Разделение растворов на органический раствор и солевой раствор позволяет не только сократить объемы концентрата, но и расходы на его утилизацию [8].

Чем меньше соотношение ХПК и солесодержания, тем легче разделить органику и соли, пример зависимостей разницы осмотических давлений (движущей силы мембранного разделения) от кратности концентрирования исходного фильтрата ТКО в мембранной установке показан на *рисунке 2*.

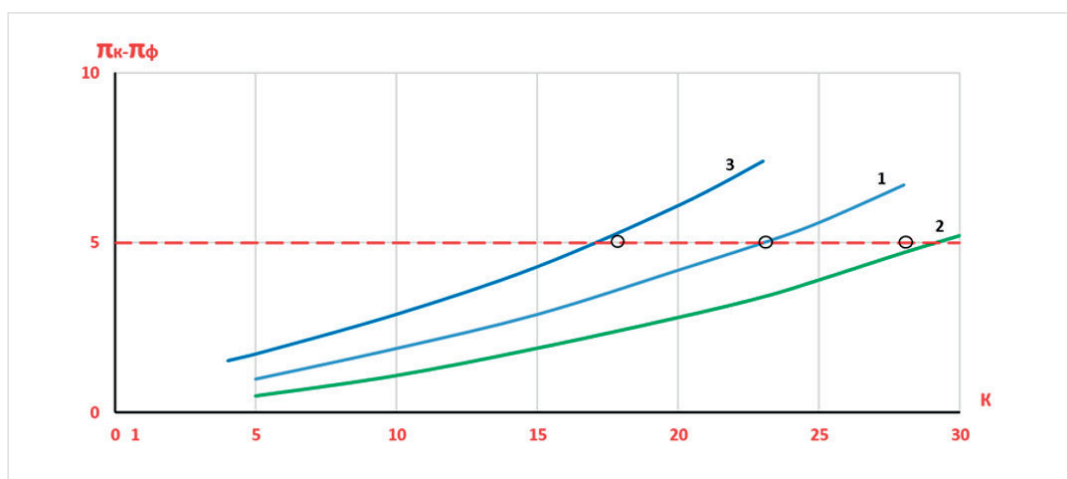


Рис. 2. Графики зависимостей разницы значений осмотических давлений в концентратах и пермеатах нанофильтрационных аппаратов на разных стадиях концентрирования и разбавления (для соотношений величин ХПК и общего солесодержания  $S - \text{ХПК}:S = 5:15$ ). 1 — исходный фильтрат ТКО; 2 — фильтрат после концентрирования с последующим разбавлением в 10 раз и второй стадии концентрирования; 3 — фильтрат после второй стадии концентрирования с последующим разбавлением и третьей стадией концентрирования

10 лет в опреснении морской воды для сокращения расхода концентрата используют технологию применения мембран с низкой селективностью, то есть мембраны, которые задерживают ионы солей не на 99 процентов, как осмос, а на 50–70 процентов, как нанофильтрация. Многие специалисты по обратному осмосу привыкли считать, что движущей силой обратного осмоса является величина давления, превышающая опресняемой воды. Но это не совсем корректно. Изобретатель осмоса Сидней Лоеб сформулировал это не так: движущей силой является величина давления, превышающая разницу между осмотическим давлением над мембраной и под мембраной. Иными словами, если мы допускаем, чтобы часть солей прошла через мембраны, например, половина солей, то для работы мембраны используется давление в два раза ниже. И наоборот, мы можем добиться в два-три раза большей концентрации солей в концентрате при низком давлении при использовании таких мембран. Что делать с такой водой, которая наполовину только лишена солей? Решение — запустить ее на вход в установку. Таким образом, при использовании новой ступени таких мембран можно уменьшить расход концентрата в 2–5 раз без дополнительных затрат энергии.

Главной идеей новой технологии является то, что у чистого органического раствора осмотическое давление в 4–5 раз меньше, чем у солевого раствора, при том же значении концентрации. То есть, если имеется раствор ХПК без солей, при тех же затратах энергии можно снизить его объем в 4 раза по сравнению с солевым раствором той же концентрации. Для решения этой проблемы подобраны другие мембраны: мембраны марки «pano NF» — новая разработка РОСНАНО. Селективность по солям у таких мембран — 50 процентов, а по органике — 85. По сравнению с мембранами 70 NE мембраны panoNF позволяют добиться более высоких значений ХПК и меньших значений солесодержания. Для практически полного разделения органики и солей разработана и экспериментально опробована технология применения промежуточной ступени разбавления и концентрирования, тогда достигается соотношение ХПК и солесодержания на уровне девять к одному.

Разделение органики и ионов достигается за счет разработанного технологического приема, описанного в [8, 9], а именно разбавления концентрированного раствора деионизованной водой с после-

дующим концентрированием с применением мембран с низкой селективностью. Для изменения соотношения органики и солей используется концентрирование раствора с применением нанофильтрационных мембран с низкой селективностью [9]. Низкоселективные мембраны позволяют задерживать органические вещества, характеризуемые значением ХПК, на 80–90 процентов, а одновалентные ионы солей (ионы натрия и аммония, хлорид-ионы) — на 50–70 процентов. Благодаря этому, при концентрировании фильтрата ТКО соотношение концентраций ХПК и солей увеличивается и доля ХПК растет [9].

Цель и задачи исследований:

- применение мембранных аппаратов, работающих при супер-высоких давлениях, как было показано, все равно не обеспечивает сокращение расхода концентрата ниже 10 процентов общего расхода очищаемого фильтрата из-за роста осмотического давления концентрата [3];
- использование выпаривания концентрата с целью дополнительного снижения его расхода также находит ограниченное применение, так как присутствие органики не позволяет осуществить выпарку до сухих солей [2].

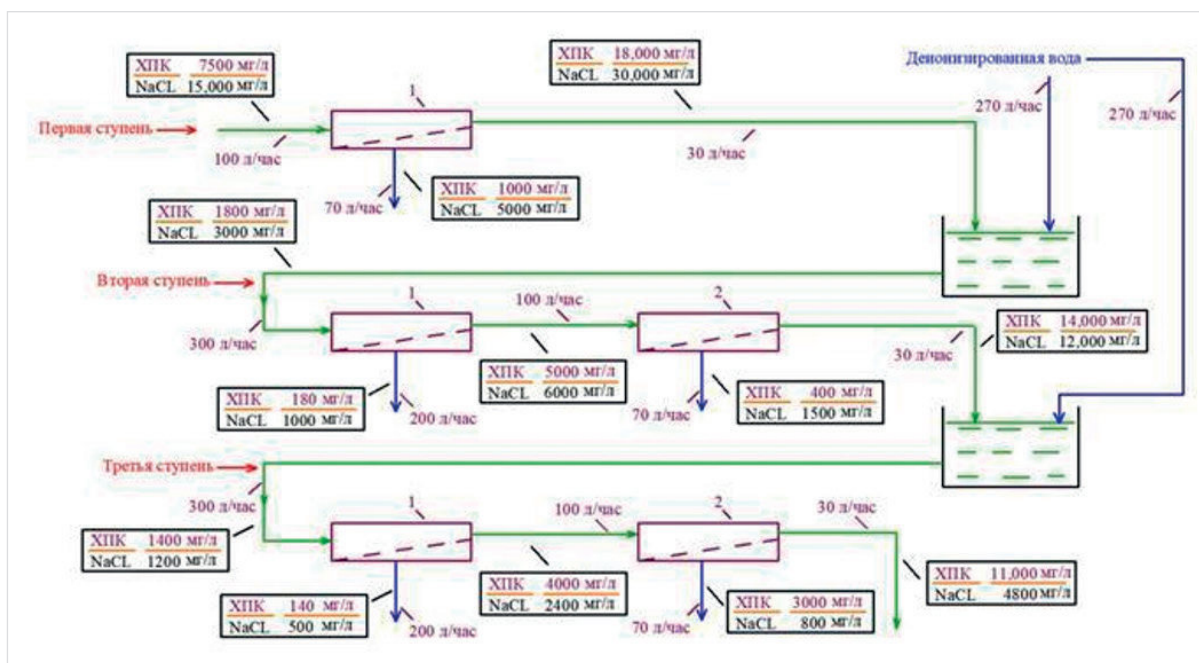
Целью проведения настоящей экспериментальной работы было продемонстрировать возможности применения новых разработок для упрощения технологии очистки фильтратов ТКО, упрощения технологии предочистки перед подачей фильтрата на мембранную установку, повышения эффективности очистки, снижения расходов концентратов, уменьшения опасности образования коллоидных, органических и солевых отложений, а также сокращения величин капитальных и эксплуатационных затрат. Основные положения, которые легли в основу создания новой технологии:

1. Главным недостатком существующих технологий очистки фильтратов ТКО представляется использование обратноосмотических мембран высокого давления, предназначенных для опреснения морской воды. Применение нанофильтрационных мембран с низкой селективностью и «ступенчатый», «каскадный» принцип их подключения позволяют не только избежать образования на мембранах кальциевых отложений [8], но и сократить расходы концентратов, доведя величину общего солесодержания в них до значения 150 граммов на литр [9]. При этом величина требуемого рабочего давления не превышает 1,6–1,8 МПа. Как уже сообщалось [5, 6], применение нанофильтрационных мембран в аппаратах рулонной конструкции позволяет сократить и даже избежать образования отложений малорастворимых солей (в основном карбоната кальция) на мембранах. Модернизация конструкции рулонных мембранных элементов и применение «открытых каналов» позволяет повысить надежность их работы, повысить эффективность удаления с мембран осадков взвешенных веществ путем проведения гидравлических промывок, и, благодаря этому, упростить предварительную очистку фильтрата ТКО от взвешенных веществ.
2. Механизм адсорбции на мембранах органических загрязнений изучен достаточно глубоко [14–21]. На поверхности мембран образуется тонкий адсорбционный слой органических загрязнений, который затем «отторгает» адсорбцию новых органических загрязнений. Применение коагулянтов и флокулянтов для снижения цветности воды и удаления (коагуляции) растворенных органических веществ часто приводит к образованию дополнительных осадков скоагулированных частиц [14–21]. Как показывает опыт работы систем обратного осмоса по обработке

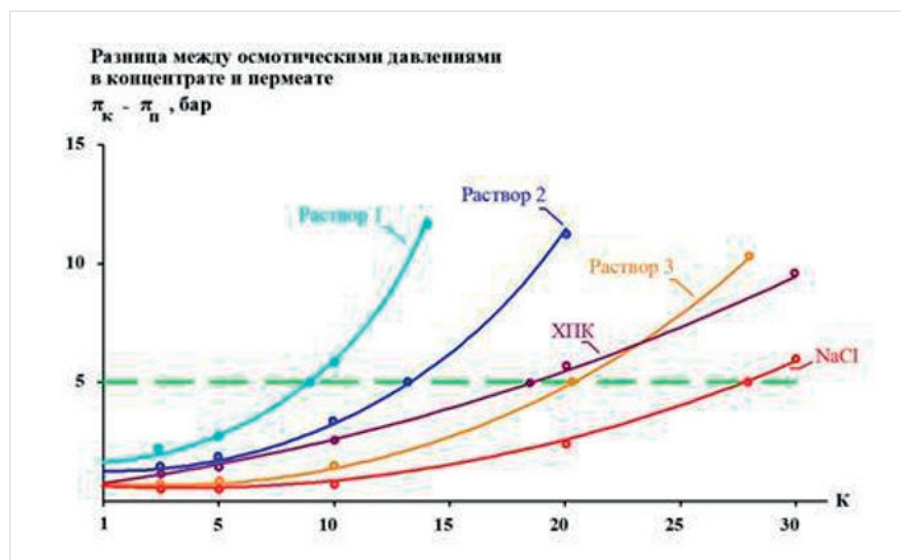
фильтратов ТКО, предварительная очистка фильтратов предусматривает только удаление взвешенных веществ из фильтрата с помощью фильтрования или контактного осветления, и не ставит целью снижение величины ХПК.

3. Присутствие в фильтрате ТКО растворенных органических соединений создает дополнительное осмотическое давление раствора, которое препятствует обработке его с применением мембран обратного осмоса, и мешает сократить расход концентрата [16 – 18]. Разделение концентрата на органический и солевой растворы и их последующие раздельная обработка и концентрирование позволяет сократить их суммарный объем еще в 3–4 раза, причем без дополнительных затрат на электроэнергию. Эффективность разделения раствора концентрата и сокращения его расхода в большой степени зависит от выбора характеристик мембран, в основном от разницы в селективности мембран по органическим веществам и одновалентным ионам.

Для состава полигона «Воскресенск» с соотношением содержания ХПК и общего солесодержания 7,5:15 проведены расчеты, позволяющие рассмотреть возможность максимального сокращения расхода концентрата. Результаты концентрирования фильтрата полигона «Воскресенск», повторного разбавления и следующего концентрирования показаны на *рис. 3 и 4*.



*Рис. 3.* Балансовая схема проведения разделения концентрата после очистки фильтрата полигона ТКО «Воскресенск» в три ступени с целью увеличения соотношения значения ХПК к значению величины общего солесодержания. ХПК исходной воды — 15 000 мг/л, величина общего солесодержания  $S = 4000$  мг/л, первая ступень — концентрирование; вторая ступень — разбавление концентрата в 10 раз деионизованной водой и последующее концентрирование; третья ступени — повторное разбавление и концентрирование



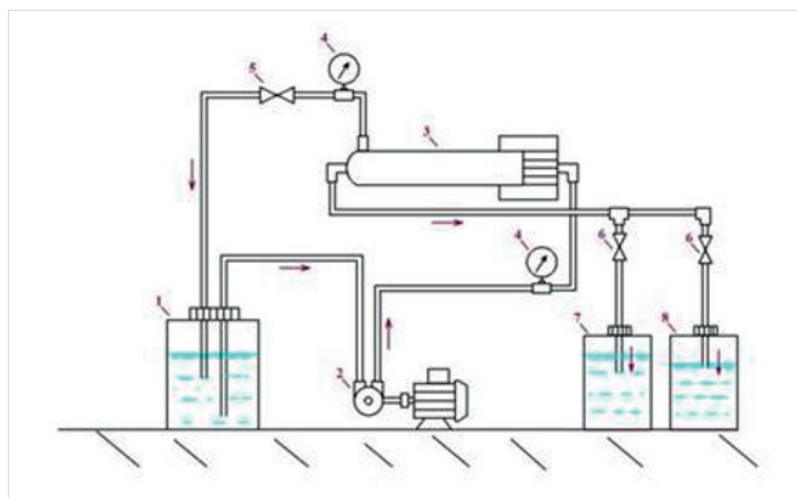
**Рис. 4.** Зависимости рассчитанных значений разницы осмотических давлений в концентратах и пермеатах мембран «70 NE» от значения коэффициента  $K$ : растворы 1, 2 и 3

Для того чтобы добиться меньшего значения общего объема концентрата, в разработанную авторами ранее схему (**рис. 1(а)**) обработки фильтрата ТКО [8] внесены изменения: после использования первой ступени с нанофильтрационными мембранами использован бак-накопитель концентрата, в который добавляется очищенная вода, и после разбавления концентрат обрабатывается на второй ступени, использующей также нанофильтрационные мембраны.

#### Описание экспериментальной установки

Для демонстрации разработанной технологии были проведены эксперименты по очистке фильтрата полигона «Александров» и разделению концентрата на раствор органических веществ. Схема экспериментальной установки показана на **рисунке 5**. Исходный фильтрат ТКО помещается в бак 1, откуда насосом 2 подается под давлением 1,6 МПа в мембранный аппарат 3. Прошедшая через мембрану очищенная вода (пермеат) собирается в баке 4, а концентрат возвращается в бак исходного раствора 1. Исходный фильтрат ТКО был сконцентрирован в 10 раз. Объем был снижен с 20 литров до 2 литров. Далее концентрат был разбавлен в 10 раз деионизованной водой, полученной путем пропускания водопроводной воды через обратноосмотический аппарат модели 100 производства фирмы «Райфил» (г. Москва, Россия). Далее после разбавления концентрат был обработан, и его объем был снижен в 20 раз. Пермеат после второго эксперимента был обработан и сконцентрирован в 10 раз. Пермеат третьей ступени представлял собой в основном раствор хлорида аммония и хлорида натрия с величиной общего содержания 2 000 мг/л, который может быть эффективно обработан на установке четвертой ступени в соответствии с разработанной технологией. В ходе экспериментов проводилась обработка фильтрата ТКО «Воскресенск». Исходный фильтрат под давлением 1,6 МПа направляли на вход в мембранный аппарат, в котором фильтрат ТКО разделялся на очищенную воду, прошедшую через мембрану (пермеат) и концентрат (раствор, содержащий все задержанные мембранами загрязнения). Солеудержание полупроницаемых нанофильтрационных мембран составляло 70 %, обратноосмотических — 96%. Удельная производительность нанофильтрационных мембранных аппаратов составляла 1,5 – 15 л/кв.м × час. Использовались рулонные элементы модели «НМЭ nano NF 1812-С» производства

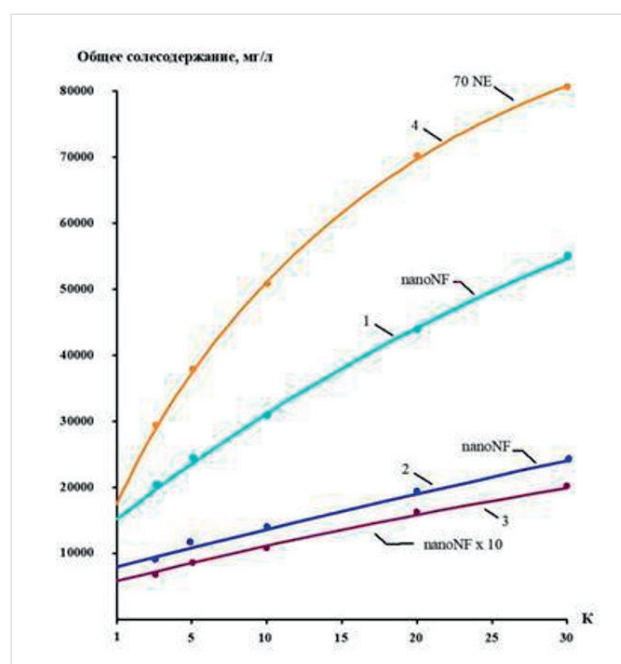
фирмы «Мембраниум» (г. Владимир, РФ), а также обратноосмотических рулонные элементы модели RE 1812-60 и нанофильтрационные элементы модели NE 1812-70 производства компании «Райфил» (г. Москва, Россия). Площадь мембран в элементах составляла 0,5 квадратного метра. Величина выхода фильтрата составляла 0,1–0,05, что соответствовало кратности уменьшения объема исходной воды в установке в 10–20 раз. Скорость транзитного потока в межмембранном пространстве напорного канала составляла 4–10 см/сек, что соответствовало расходам транзитного потока через мембранный аппарат 100–160 л/час. В процессе работы установки происходит увеличение величины общего солевого содержания концентрата и рост значений ХПК в концентрате. Таким образом, в концентрате происходит накопление органических веществ, что существенно увеличивает значение осмотического давления. Благодаря низкому значению селективности мембран первой ступени по солям, в пермеате первой ступени устанавливается высокое осмотическое давление, что сокращает разницу осмотических давлений между концентратом и пермеатом, и позволяет вести разделение раствора концентрата при относительно низких значениях рабочего давления (не выше 1,6–1,8 МПа). Благодаря относительно высокой селективности нанофильтрационных мембран по растворенным органическим веществам (90%) в концентрате первой ступени растет концентрация органических веществ. Пермеат первой ступени проходит дополнительную очистку с применением нанофильтрационных мембран второй ступени для полного удаления органических веществ. Пермеат второй ступени используется для разбавления концентрата первой ступени для последующей очистки на третьей ступени и сокращения в концентрате содержания ионов солей. Концентрат третьей ступени имеет значение ХПК не менее 120–160 г/л. В случае необходимости концентрат может быть смешан с грунтом или с обезвоженным осадком станций очистки воды, направляемым на специальный полигон. Затраты на обработку осадка составляют не более 20–30 руб. за 1 куб. м. В этом случае в результате обработки фильтрата ТКО может быть получен осадок, содержащий органические продукты разложения коммунальных отходов, и концентрированный раствор хлоридов натрия и аммония, используемый в качестве сырья для производства удобрений.



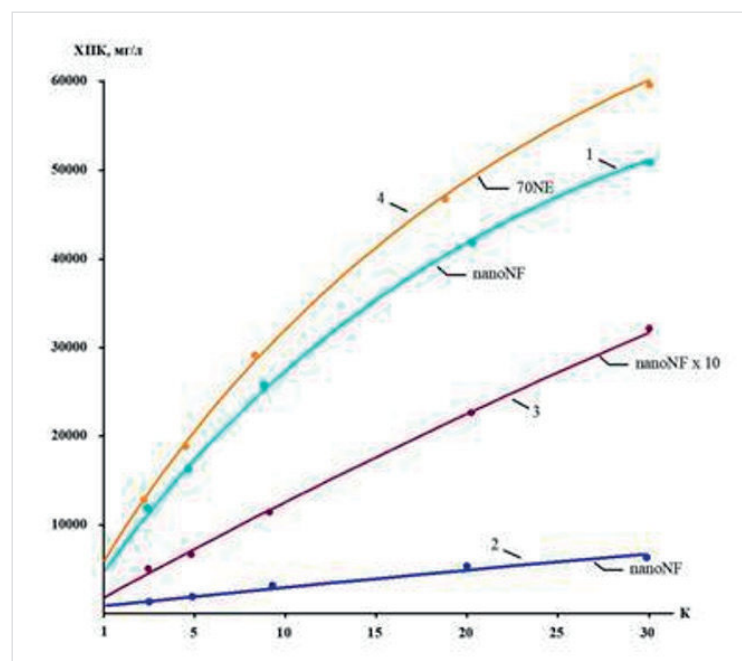
**Рис. 5.** Экспериментальная установка для определения параметров работы мембран при разделении фильтрата ТКО: 1 — бак исходной воды; 2 — насос; 3 — мембранный аппарат; 4 — манометр; 5 — регулирующий вентиль; 6 — запорные краны; 7 — бак пермеата мембраны I ступени; 8 — бак сбора пермеата при концентрировании

На **рис. 6–9** представлены зависимости значений общего солевого содержания, ХПК и концентраций кальция от величины коэффициента  $K$  при проведении концентрирования фильтрата ТКО с приме-

нением мембран «70NE» и «папоNF», а также проведение обработки фильтрата после первого цикла разбавления и концентрирования.



**Рис. 6.** Зависимости величин общего солевого содержания от значения коэффициента снижения объема  $K$  при обработке фильтрата ТКО «Воскресенск»: 1 — концентрирование исходного фильтрата с применением мембран «папоNF»; 2 — концентрирование фильтрата первой ступени с применением мембран «папоNF»; 3 — вторая ступень концентрирования после разбавления, применение мембран «папоNF»; 4 — концентрирование исходного фильтрата с применением мембран «70 NE»



**Рис. 7.** Зависимости значений ХПК от значения коэффициента снижения объема  $K$  при обработке фильтрата ТКО «Воскресенск»

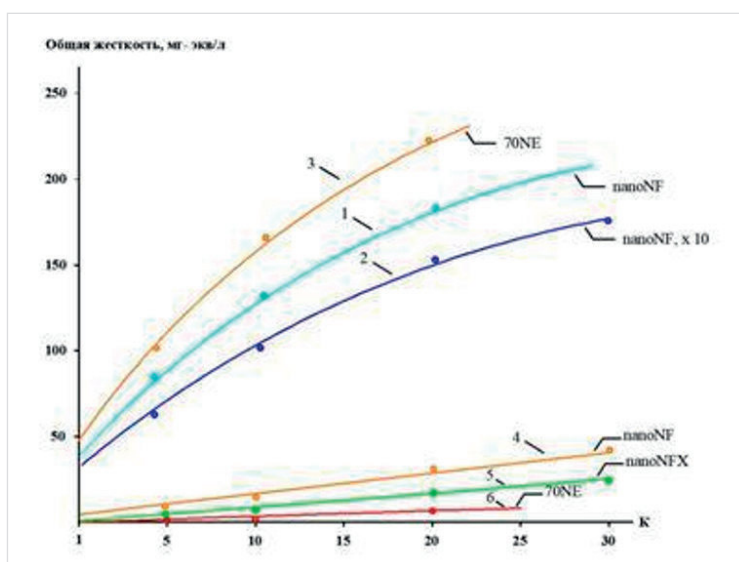


Рис. 8. Зависимости значений концентраций кальция от значения коэффициента снижения объема  $K$  при обработке фильтрата ТКО «Воскресенск»

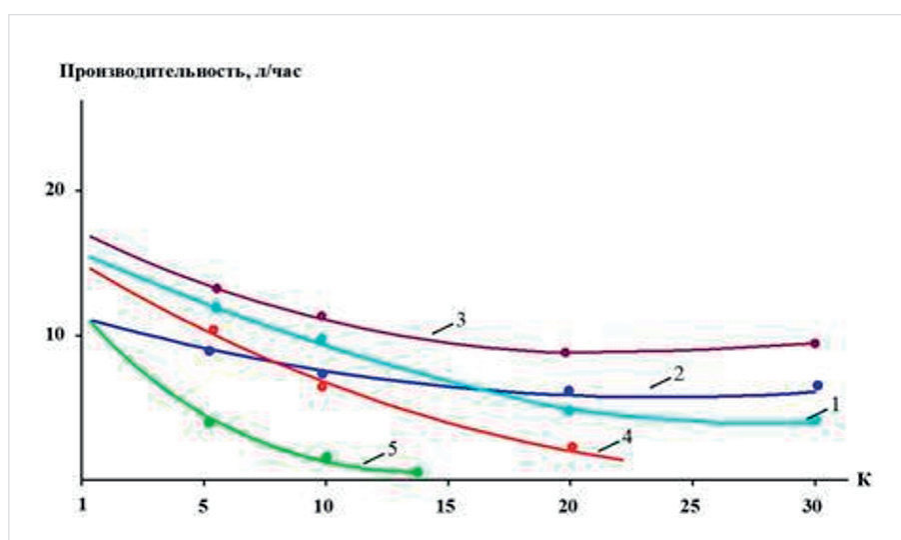
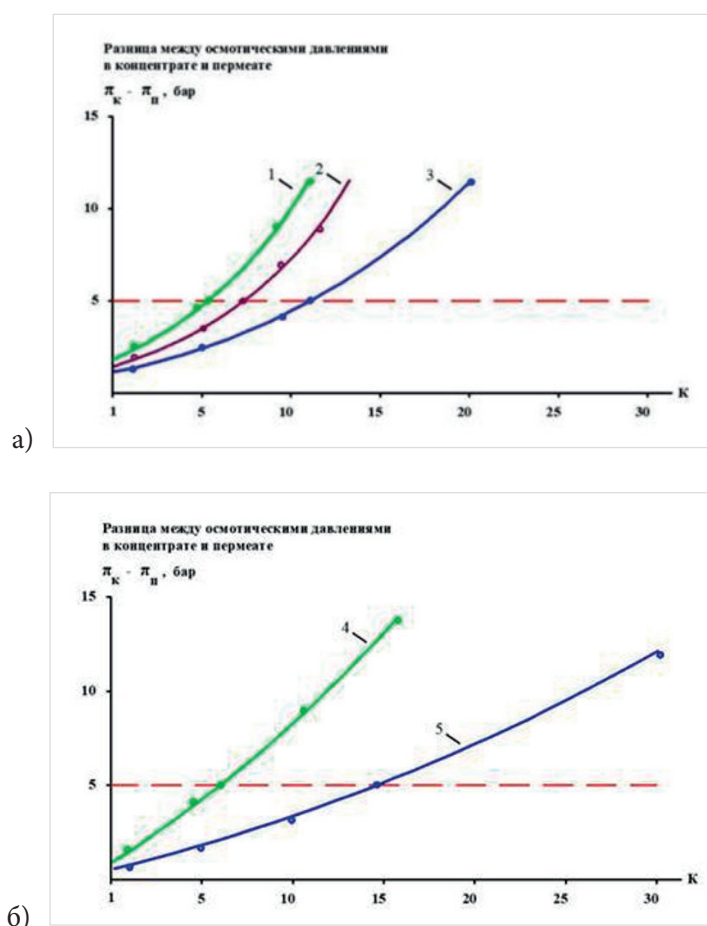


Рис. 9. Результаты проведения разделения фильтрата ТКО: 1, 3 — снижение производительности нанофильтрационного мембранного элемента с мембранами «70 NE» с ростом концентрирования (значение коэффициента снижения объема  $K$ ) при обработке исходного фильтрата и пермеата первой ступени; 2, 4 — снижение производительности мембранного нанофильтрационного элемента с мембранами «nanoNF» при обработке исходного фильтрата и пермеата первой ступени; 5 — снижение производительности мембранного элемента с мембранами высокого давления «SW»

На **рисунке 3** представлена новая разработка авторов для очистки фильтратов на полигоне «Воскресенск», в которой применяется технология разбавления концентрата первой ступени и последующее его концентрирование на второй ступени, использующей также нанофильтрационные мембраны. Для предварительных расчетов балансов концентраций использовались мембраны «70 NE». Благодаря использованию нанофильтрационных мембран на второй ступени, в концентрате второй

ступени в основном содержатся органические вещества, а концентрация солей оказывается существенно снижена. Это позволяет значительно (в 2–3 раза) сократить расход концентрата на второй ступени по сравнению с расходом концентрата в схемах, показанных на *рисунке 1*. Концентрат первой ступени и концентрат второй ступени поступают в бак-смеситель, в который также поступает деионизованная вода для разбавления — пермеат третьей ступени, использующей обратноосмотические мембраны. Разбавление производится в 5 раз. После разбавления концентрат поступает на вторую ступень обработки, а пермеат второй ступени – на третью ступень. Таким образом, из фильтрата ТКО получается очищенная вода с содержанием солей 5 мг/л и концентрацией аммония 0,2–0,5 мг/л.

Результаты проведенных экспериментов (*рис. 6–9*) показывают, что селективность мембран «70NE» как по солям, так и по органическим веществам существенно выше, чем у мембран «nanoNF». Результаты предварительных расчетов (*рис. 3*) показали, что эффект разделения с применением мембран «70 NE» требует три ступени, и содержит два цикла разбавления и последующего концентрирования. Результаты экспериментов показывают, что селективность мембран «70NE» в реальности оказалась выше, чем предварительно рассчитанная. Поэтому применение мембран «70NE» даже при первом концентрировании показывает высокое содержание в концентрате и неэффективное разделение. Как показывают результаты обработки фильтрата ТКО с применением мембран «nanoNF» (*рис. 10 и 11*), благодаря низкой селективности этих мембран по ионам солей разделение органики и солей происходит эффективнее.



*Рис. 10.* Зависимости разницы осмотических давлений от  $K$  для определения максимального значения  $K$ : а) эксперименты с применением мембран 70NE; б) эксперименты с использованием мембран «nanoNF». 1, 4 — концентрирование исходного фильтрата (первый шаг); 2, 5 — второй шаг: первый цикл разбавления и последующего концентрирования; 3 — третий шаг: второй цикл разбавления и концентрирования

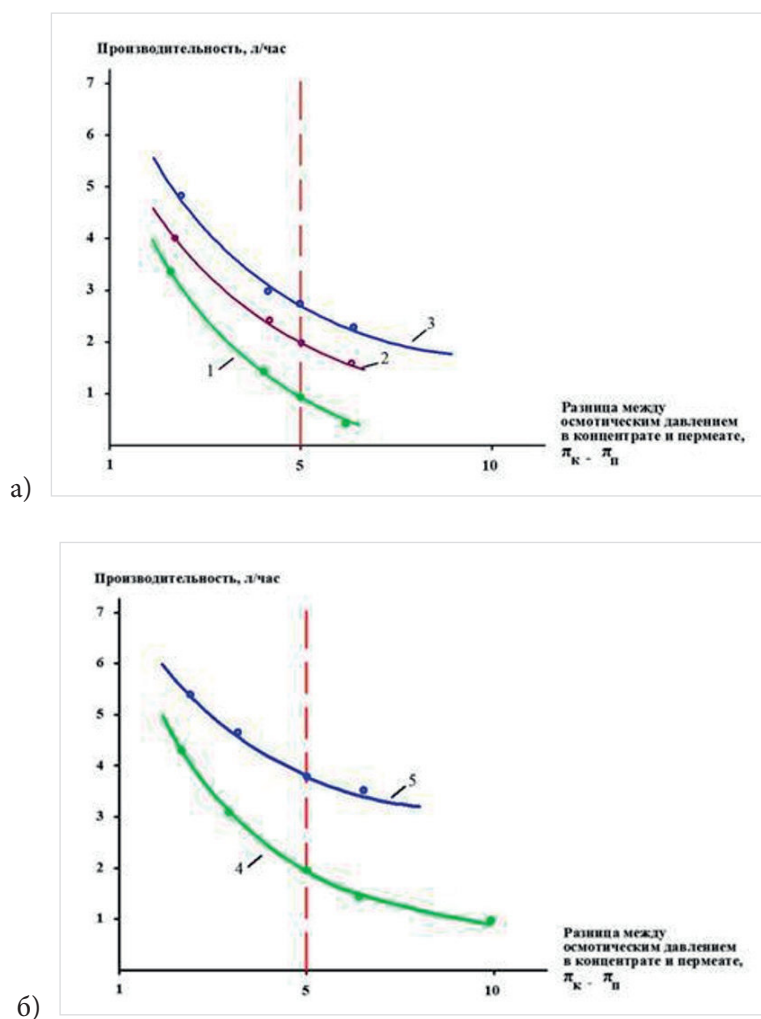


Рис. 11. Зависимости производительности мембран от разницы осмотических давлений в концентрате и пермеате: а) при использовании мембран «70NE»; б) при использовании мембран «nanoNF»

На рисунке 12 принципы определения требуемой площади мембран и мембранных элементов на каждой ступени установки очистки фильтрата ТКО.

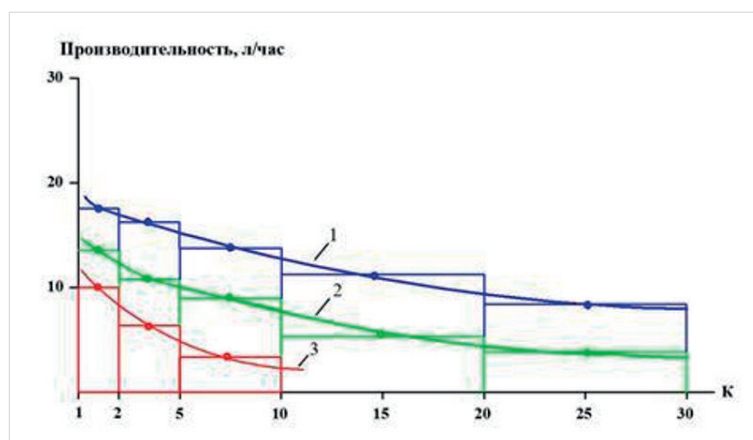


Рис. 12. Принципы определения требуемой площади мембран и количества мембранных элементов на каждой ступени очистки фильтрата полигона «Воскресенск».

Известная компания БМТ-сервис, которая поставила много установок технологии БМТ на полигонах в Московской области поставила задачу: избавиться от концентратов. В Воскресенске на полигоне поставили установку дистилляции для выпаривания концентрата установок обратного осмоса. Она рассчитана на обработку воды с расходом 30 куб. м в сутки. То есть, в нее поступает 30 тонн в сутки, остается 10 тонн концентрата. Его смешивают с торфом топливом для цементного завода, поступающим в гранулированном виде. Потом влажный торф сушат, и все соли с органикой остаются в торфе. После сжигания зола используется при производстве цемента. Но: в среднем одна установка БМТ-сервис перерабатывает в сутки 100 кубов фильтрата, из остается 30 кубов концентрата. А таких установок в районе Воскресенска — 10. И концентрат сводится на полигон в Воскресенск. Поэтому в данной работе была поставлена задача: снизить общий объем концентрата в 10 раз, с 300 до 30 кубов. Это самая мощная установка по обработке фильтрата ТКО, вернее по доконцентрированию концентрата с расходом 300 кубов в сутки.

Наличие органики в фильтрате мешает сконцентрировать исходный фильтрат ТКО более чем в 3 раза по объему. Новым в способе является сокращение объема концентрата, содержащего органические вещества за счет того, что концентрат первой ступени разбавляется чистой водой и проходит дополнительную ступень, где разделяется на раствор солей и раствор органики. Благодаря низкой селективности и применению второй ступени, концентрация солей в концентрате оказывается сильно сниженной, что позволяет сократить объем концентрата в 2–3 раза. Технический результат достигается использованием двухступенчатой схемы нанофильтрации для обработки фильтрата ТКО, аналогичного составу полигона «Воскресенск» и разделения органики и солей с получением двух растворов концентратов: концентрированного раствора органических веществ и концентрированного раствора одновалентных ионов (в основном хлоридов натрия и аммония). Исходный фильтрат ТКО с расходом 100 куб. м в сутки с величиной ХПК 5 000 мг/л и с концентрацией хлорида натрия 4 000 мг/л проходит мембранные аппараты первой ступени с нанофильтрационными низкоселективными мембранами (средняя селективность по солям составляет 70%). Таким образом, после первой ступени получаем раствор с содержанием ХПК 500 мг/л и содержанием NaCl 1 500 мг/л. Расход концентрата составляет 3 куб. м в сутки. Расход пермеата составляет 97 куб. м в сутки. Пермеат аппаратов первой ступени и пермеат аппаратов третьей ступени содержат органические вещества и проходят очистку с применением низкоселективных нанофильтрационных мембран на второй ступени. Концентрат второй ступени поступает в бак-смеситель, туда же поступает концентрат первой ступени. В бак-смеситель поступает также пермеат аппаратов второй ступени. Таким образом, в баке-смесителе происходит разбавление концентрата в 5 раз. Поскольку селективность по органическим веществам у мембран выше, чем по одновалентным ионам солей, соотношение концентраций органики и соли в смеси оказывается выше, чем в исходной воде. После разбавления в баке концентрат поступает снова на третью ступень обработки. После аппаратов третьей ступени и концентрат содержит всю органику и только 1/4 часть всех солей, при этом составляет по объему 1/10 часть исходной воды. Пермеат 3 ступени поступает в бак, откуда с помощью насоса поступает на 4 ступень с мембранами нанофильтрации и для концентрирования органики. Концентрат аппаратов 4 ступени возвращается в бак, а пермеат 4 ступени направляется в аппараты первой ступени обратного осмоса с получением обессоленной воды. Концентрат после аппаратов обратного осмоса первой ступени проходит дополнительное концентрирование с применением аппаратов нанофильтрации с получением солевого концентрата с концентрацией хлорида натрия 140 граммов на литр. После 1 ступени обратного осмоса вода проходит еще 2 ступени очистки для снижения концентрации аммония. Концентраты каждой ступени возвращаются на вход в предыдущую ступень. Таким образом, из исходного фильтрата ТКО получаем очищенную воду с солесодержанием 5–10 мг/л и содержанием аммония порядка 0,2 мг/л и два концентрата:

солевой концентрат с концентрацией солей 100–150 г/ (смесь солей натрия и аммония) и органический концентрат, смесь органики (с концентрацией ХПК 100 г/л) и солей кальция, магния, натрия и аммония с концентрацией 30–40 г/л. Расход солевого концентрата составляет 2% от расхода исходного фильтрата, а концентрата органического раствора составляет 5%. Органический концентрат может быть смешан с грунтом или с осадком станций очистки природных и сточных вод и направлен на полигон. Солевой концентрат может быть выпарен до сухих солей. В **таблице 2** представлено экономическое сравнение эксплуатационных затрат при очистке полигонов ТКО и утилизации концентратов с применением различных технологических схем. Рассчитанные количества мембранных элементов легли в основу определения годовых затрат на замену мембран для каждой их рассмотренных схем обработки фильтрата ТКО [22–26]. Балансовая схема процесса очистки в соответствии с разработанной новой технологией разделения концентрата на органический и солевой растворы представлена на **рисунке 13**.

Она включает: ступени с нанофильтрационными мембранами, ступени низконапорного осмоса, ступени по концентрированию и доведению концентраций солей и ХПК до 100–120 г/литр. Благодаря применению мембран РОСНАНО возможно еще в 2–3 раза сократить расход концентрата, то есть вообще отменить стадию выпарки.

Таблица 2

**Таблица экономического сравнения эксплуатационных затрат при очистке полигонов ТКО и утилизации концентратов с применением различных технологических схем**

| № | Показатели                      |                                  | Технологии                 |                                           |                      |                               |                                             |
|---|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
|   |                                 |                                  | Мембраны высокого давления | Мембраны высокого давления и фильтр-пресс | Реагентно-мембранная | С применением нано-фильтрации | С применением нано-фильтрации и разделением |
| 1 | Расход фильтрата ТКО            |                                  | 100                        | 100                                       | 100                  | 100                           | 100                                         |
|   | Расход очищенной воды           |                                  | 70                         | 85                                        | –                    | –                             | –                                           |
|   | Расход концентрата              | I ступень                        | 30                         | 15                                        | 3                    | 4,5                           | 3                                           |
|   |                                 | II ступень                       | –                          | –                                         | –                    | –                             | 2                                           |
|   |                                 | III ступень                      | –                          | –                                         | –                    | –                             | 1                                           |
| 2 | <b>Эксплуатационные расходы</b> |                                  |                            |                                           |                      |                               |                                             |
|   | Расходы эл. энергии             | Уд. расход, кВт/м <sup>3</sup>   | 14                         | 19                                        | 4,2                  | 3,6                           | 4,8                                         |
|   |                                 | Годовые затраты                  | 1 950 000,00               | 2 500 000,00                              | 800 000,00           | 700 000,00                    | 815 000,00                                  |
|   | Замена мембран                  | Кол-во мембранных элементов      | 49                         | 61 (49+12)                                | 30                   | 36                            | 48                                          |
|   |                                 | Стоимость элемента               | 50 000,00                  | 50 000,00 + 100 000,00                    | 50 000,00            | 50 000,00                     | 50 000,00                                   |
|   |                                 | Годовые затраты на замену        | 490 000,00                 | 730 000,00                                | 300 000,00           | 360 000,00                    | 480 000,00                                  |
| 3 | <b>Затраты на реагенты</b>      |                                  |                            |                                           |                      |                               |                                             |
|   | Химические промывки             | Расход на 1 промывку, кг         | 100                        | 100                                       | 60                   | 70                            | 84                                          |
|   |                                 | Кол-во промывок в год            | 8                          | 8                                         | 4                    | 8                             | 8                                           |
|   |                                 | Годовые затраты на хим. промывки | 300 000,00                 | 300 000,00                                | 120 000,00           | 300 000,00                    | 360 000,00                                  |
|   | Ингибитор                       | Доза, мг/м <sup>3</sup>          | 10                         | –                                         | –                    | –                             | –                                           |
|   |                                 | Годовой расход                   | 500                        | –                                         | –                    | –                             | –                                           |
|   |                                 | Годовые затраты                  | 90 000,00                  | –                                         | –                    | –                             | –                                           |
|   | Коагулянт и флокулянт           | Доза, мг/м <sup>3</sup>          | 10                         | 10                                        | 5000                 | –                             | –                                           |
|   |                                 | Годовой расход                   | 360                        | 360                                       | 180000               | –                             | –                                           |
|   |                                 | Годовые затраты                  | 140 000,00                 | 140 000,00                                | 500 000,00           | –                             | –                                           |

| № | Показатели                             | Технологии                                         |                                           |                      |                               |                                             |
|---|----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
|   |                                        | Мембраны высокого давления                         | Мембраны высокого давления и фильтр-пресс | Реагентно-мембранная | С применением нано-фильтрации | С применением нано-фильтрации и разделением |
| 4 | Затраты на обработку концентрата       |                                                    |                                           |                      |                               |                                             |
|   | Выпарка                                | Расход                                             | 15                                        | 75                   | —                             | 2                                           |
|   |                                        | Уд. затраты на выпарку, кВт/м³                     | 22                                        | 22                   | 22                            | —                                           |
|   |                                        | Годовые затраты на выпарку                         | 700 000,00                                | 360 000,00           | —                             | 120 000,00                                  |
|   | Удаление с осадком                     | Расход                                             | 15                                        | 7,5                  | 3                             | 4,5                                         |
|   |                                        | Уд. затраты, руб/м³·сут                            | 2 000,00                                  | 2 000,00             | 3 000,00                      | 4 000,00                                    |
|   |                                        | Затраты на смесь с обезвреженным остатком, руб/сут | 30 000,00                                 | 15 000,00            | 9 000,00                      | 18 000,00                                   |
|   |                                        | Годовые затраты на смесь с осадком                 | 10 800 000,00                             | 5 400 000,00         | 3 240 000,00                  | 6 480 000,00                                |
|   | Выпарка досуха (сушка)                 | Расход                                             | —                                         | —                    | —                             | 2                                           |
|   |                                        | Уд. затраты на сушку, кВт                          | —                                         | —                    | —                             | 23                                          |
|   |                                        | Годовые затраты, руб/год                           | —                                         | —                    | —                             | 180 000,00                                  |
| 5 | Итого годовые эксплуатационные затраты |                                                    | 14 770 000,00                             | 9 430 000,00         | 4 960 000,00                  | 7 840 000,00                                |
|   |                                        |                                                    |                                           |                      |                               | 3 275 000,00                                |

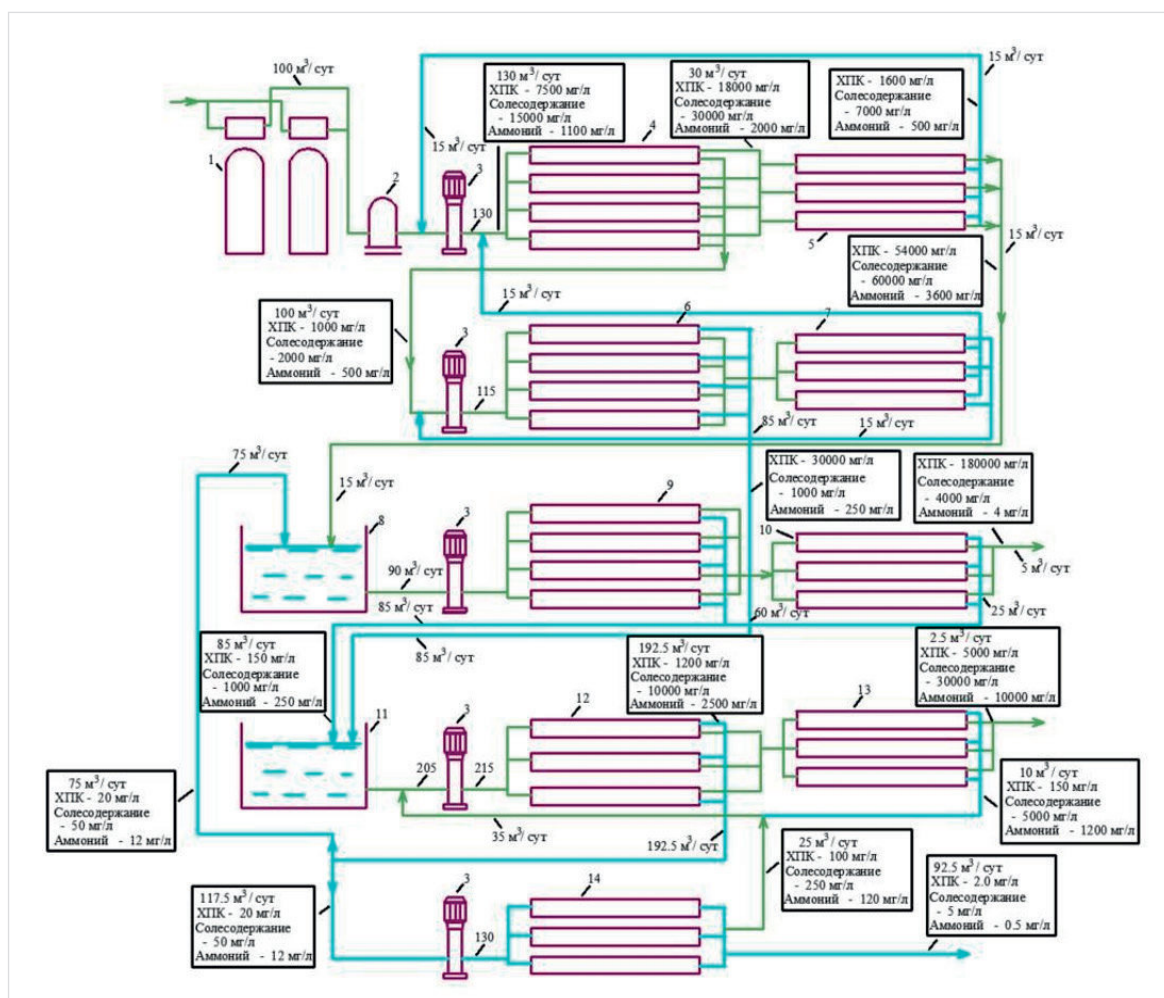


Рис. 13. Балансовая схема очистки фильтрата ТКО «Воскресенск» в соответствии с разработанной авторами новой схемой разделения концентрата на «солевой» и «органический» растворы: 1 — механические

фильтры предочистки; 2 — патронные (дисковые) фильтры; 3 — рабочий многоступенчатый центробежный насос; 4 — нанофильтрационные аппараты первой ступени; 5 — нанофильтрационные аппараты снижения расхода концентрата первой ступени; 6 — нанофильтрационные аппараты второй ступени; 7 — нанофильтрационные аппараты для снижения расхода концентрата второй ступени; 8 — бак для сбора и разбавления концентрата первой ступени; 9 — нанофильтрационные аппараты третьей ступени для концентрирования органических веществ; 10 — нанофильтрационные аппараты для концентрирования и сокращения расхода концентрата органических веществ; 11 — бак сбора пермеата третьей ступени; 12 — обратноосмотические аппараты четвертой ступени; 13 — нанофильтрационные аппараты сокращения расхода «солевого» концентрата четвертой ступени; 14 — обратноосмотические аппараты пятой ступени.

Данные **таблицы 2** показывают сравнение эксплуатационных затрат при использовании различных описанных технологий очистки фильтрата ТКО для очистки фильтрата и утилизации концентрата. В таблице показаны сравнения затрат для стандартного случая очистки фильтрата ТКО, для случая применения промежуточной ступени супер высокого давления, для случая применения новой технологии, реализованной при использовании мембран 70 NE, и для новой технологии с применением мембран РОСНАНО и полным разделением концентрата на солевой и органический растворы. Технология запатентована. Экономия достигается за счет сокращения затрат на выпарку.

На **рис. 14** показаны фото основных ступеней установки в Воскресенске: первой ступени нанофильтрации, блока концентрирования, ступеней обратного осмоса.



**Рис. 14.** Фото основных ступеней установки в Воскресенске

Таким образом, новым техническим результатом в способе является сокращение объема концентрата и разделение его на два объема за счет того, что фильтрат подвергается двухступенчатой обработке с применением нанофильтрационных мембран с низкой селективностью. Концентрат нанофильтрационных мембранных аппаратов направляется в бак-смеситель, а затем полученная смесь обрабатывается повторно с применением нанофильтрационных мембранных аппаратов третьей ступени. Пермеат нанофильтрационных аппаратов 1 ступени снова обрабатывается с применением нанофильтрационных аппаратов второй ступени для более полного извлечения органики.

## Выводы:

1. Разработана технология сокращения расхода и утилизации концентрата мембранных установок, используемых для очистки фильтратов полигонов ТКО. Технология использует насосы высокого давления, обратноосмотические и нанофильтрационные аппараты и отличается от традиционных технологий тем, что дополнительно содержит баки-смесители и дополнительную ступень очистки, включающую насосы и нанофильтрационные мембранные аппараты.
2. Разработанная технология сокращения расхода концентрата позволяет сократить затраты на утилизацию концентрата (выпаривание) за счет того, что разделение концентрата на растворы органики и солей сокращает величину осмотического давления, благодаря чему концентрат может быть сконцентрирован в большее количество раз, что позволяет отказаться от выпарки.
3. Разработанная технология позволяет разделить концентрат на 2 раствора. Солевой раствор может быть выпарен до сухих солей, а концентрат с органикой (малая часть) — смешивается с осадком, направляемым на обезвоживание, что сокращает затраты на утилизацию концентрата.

## Библиографический список

1. *Mariam, T.; Nghiem, L. D.* Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes. *Desalination* 2010, 250, 677–681, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.03.024>.
2. *Marks, A. L.; Luthy, R. G.; Diwekar, U. M.* Semi-Continuous evaporation model for leachate treatment process evaluation. *Environ. Prog.*, 1994, 13, 278–288.
3. *Abu Sharkh, B.; Al-Amoudi, A. A.; Farooque, M.; Fellows, C. M.; Ihm, S.; Lee, S.; Li, S.; Voutchkov, N.* Seawater desalination concentrate—a new frontier for sustainable mining of valuable minerals. *npj Clean Water* 2022, 5, 1–16, <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00153-6>.
4. *Di Palma, L.; Ferrantelli, P.; Merli, C.; Petrucci, E.* Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis. *Waste Manag.* 2002, 22, 951–955, [https://doi.org/10.1016/s0956-053x\(02\)00079-x](https://doi.org/10.1016/s0956-053x(02)00079-x).
5. *Gripa, E.; Daflon, S. D. A.; de Almeida, R.; da Fonseca, F. V.; Campos, J. C.* Landfill leachate treatment by high-pressure membranes and advanced oxidation techniques with a focus on ecotoxicity and by-products management: A review. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2023, 173, 747–764, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.074>.
6. *Talalaj, I. A.; Bartkowska, I.; Biedka, P.* Treatment of young and stabilized landfill leachate by integrated sequencing batch reactor (SBR) and reverse osmosis (RO) process. *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.* 2021, 16, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100502>.
7. *Linde, K.; Jönsson, A.-S.; Wimmerstedt, R.* Treatment of three types of landfill leachate with reverse osmosis. *Desalination* 1995, 101, 21–30, [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00004-1](https://doi.org/10.1016/0011-9164(95)00004-1).
8. *Shirkova, T.; Pervov, A.; Kiryushina, M.* Development of a new technique to treat municipal waste landfill leachate with low pressure reverse osmosis and nanofiltration membranes. *ESU (Euroasia-Science)*, 2020, 74 (4), 11–19. DOI: 0.31618/ESU.2413-9335.2020.4.74/4.
9. *Pervov, A.; Shirkova, T.; Frenkel, V.* New technology to treat leachate by low pressure reverse osmosis. *Desalination and Water Treat.* 2022, 259, 230–243, <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28143>.

10. Pervov, A. G. Scale formation prognosis and cleaning procedure schedules in reverse osmosis systems operation. *Desalination* 1991, 83, 77 – 118, [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(91\)85087-b](https://doi.org/10.1016/0011-9164(91)85087-b).
11. Demir, I.; Koyuncu, I.; Guclu, S.; Yildiz, S.; Balahorli, V.; Caglar, S.; Turken, T.; Pasaoglu, M. E.; Kaya, R.; Sengur-Tasdemir, R. An Autopsy of Nanofiltration Membrane Used for Landfill Leachate Treatment. *Sci. World J.* 2015, 2015, 850530, <https://doi.org/10.1155/2015/850530>.
12. Hilal, N.; Al-Zoubi, H.; Mohammad, A.W.; Darwish, N.A. Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity. *Desalination*, 2005, 184, 315 – 326. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.062>.
13. De Almeida, R.; Campos, J. C. Membranes in Landfill Leachate Treatment: Evaluation of the Generated Concentrate. *Landfill Leachate Treatment Techniques*, 2024, 159 – 175, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-63157-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63157-3_8).
14. Pervov, A. G.; Andrianov, A. P. Application of membranes to treat wastewater for its recycling and reuse: new considerations to reduce fouling and increase recovery up to 99 percent. *Desalination Water Treat.* 2011, 35, 2 – 9, <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.3133>.
15. Pervov, A. Investigation of Scaling and Inhibition Mechanisms in Reverse Osmosis Spiral Wound Elements. *Membranes* 2022, 12, 852, <https://doi.org/10.3390/membranes12090852>.
16. Ahmad, N. N. R.; Ang, W. L.; Teow, Y. H.; Mohammad, A. W.; Hilal, N. Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review. *J. Water Process. Eng.* 2022, 45, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102478>.
17. Mohammad, A.; Hilal, N.; Al-Zoubi, H.; Darwish, N. Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 2007, 289, 40 – 50, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.11.035>.
18. Turek, M.; Mitko, K.; Piotrowski, K.; Dydo, P.; Laskowska, E.; Jakóbiak-Kolon, A. Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination* 2017, 401, 180 – 189, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.047>.
19. Yoon, Y.; Lueptow, R. Removal of organic contaminants by RO and NF membranes. *J. Membr. Sci.* 2005, 261, 76 – 86, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.03.038>.
20. Wilf, M. The Guidebook to Membrane Technology for Wastewater Reclamation; Balaban Desalination Publications: Hopkinton, MA, USA, 2010; pp. 401 – 438. <https://www.amazon.com/Guidebook-Membrane-Technology-Wastewater-Reclamation/dp/086689067X> (accessed on 26 January, 2010).
21. Winters, H. Control of organic fouling at two seawater reverse osmosis plants. *Desalination* 1987, 66, 319 – 325, [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(87\)90214-1](https://doi.org/10.1016/0011-9164(87)90214-1).
22. Zhou, D.; Zhu, L.; Fu, Y.; Zhu, M.; Xue, L. Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies — A review. *Desalination* 2015, 376, 109 – 116, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.020>.
23. Wang, Z.; Deshmukh, A.; Du, Y.; Elimelech, M. Minimal and zero liquid discharge with reverse osmosis using low-salt-rejection membranes. *Water Res.* 2020, 170, 115317, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115317>.
24. De Almeida, R.; Couto, J. M. D. S.; Gouvea, R. M.; Oroski, F. D. A.; Bila, D. M.; Quintaes, B. R.; Campos, J. C. Nanofiltration applied to the landfill leachate treatment and preliminary cost estimation. *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.* 2020, 38, 1119 – 1128, <https://doi.org/10.1177/0734242x20933333>.

25. Weber, B.; Holz, F. Landfill Leachate Treatment by Reverse Osmosis. Effective Industrial Membrane Processes — Benefits and opportunities, 1991, 143 – 154. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3682-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3682-2_10).
26. De Almeida, R.; Bila, D. M.; Quintaes, B. R.; Campos, J. C. Cost estimation of landfill leachate treatment by reverse osmosis in a Brazilian landfill. Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ. 2020, 38, 1087 – 1092, <https://doi.org/10.1177/0734242x20928411>.
27. Абдуллаев Э. Р., Окольников Г. Э. Влияние композитного армирования на повышение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных аэродромных и дорожных покрытий // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 103 – 109.
28. Ляпидевская О. Б. Инновационные подходы к разработке строительных материалов нового поколения // Системные технологии. 2024. № 3 (52). С. 42 – 46.
29. Окольников Г. Э., Куликова К. П., Бочукова М. И., Краюшкина Е. О. Актуальность применения внешнего армирования с использованием композитных материалов // Системные технологии. 2023. № 2 (47). С. 93 – 100.
30. Mahadi M. I. A., Okolnikova G. E., Obeid M. A. A., Akoev F. Sh., Kissani M. Heat Treatment of Concrete During the Cold Season // Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 5 – 14.
31. Okolnikova G. E., Soumyadeep S., Akoev F. Sh. Comparison of Finite Element Method and Force Method in Analysis of Frame Elements // Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 24 – 33.
32. Lalin V. V., Ngo H. H., Vavilova A. M. A Finite Element Force Method Applied to Free Vibration of Rod Systems // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 34 – 46.

---

## IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR TREATMENT OF LEACHATE FROM SOLID WASTE LANDFILLS: ADVANCING MEMBRANE AND DEVICE TECHNOLOGY, REDUCING CONCENTRATE CONSUMPTION

T. N. Shirkova \*

A. K. Strelkov \*\*

A. G. Pervov \*\*\*

\* National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow

\*\* Samara State Technical University (Samara Polytech), Samara

\*\*\* Russian State University for Geological Prospecting is named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow

---

### Abstract

Landfill leachate is a dark, viscous liquid formed by the decomposition and decay of solid household waste within the landfill and its interaction with precipitation. In addition to organic substances and salts (such as ammonium salts), landfill leachate contains toxic chemical compounds at concentrations exceeding established maximum permissible limits for discharge into water

### The Keywords

Reverse osmosis, nanofiltration, membrane selectivity, low-selectivity membranes, solid municipal waste landfill, reverse osmosis unit, leachate, concentrate.

bodies. The volume of leachate generated depends on the landfill's surface area, its operational lifespan, the volume of accumulated waste, the quality of the daily waste-layering and covering process, annual precipitation levels, and the season.

**Date of receipt in edition**

07.09.2026

**Date of acceptance for printing**

11.09.2026

**Ссылка для цитирования:**

Т. Н. Ширкова, А. К. Стрелков, А. Г. Первов. Совершенствование технологии очистки фильтратов полигонов ТКО: подбор мембран и аппаратов, сокращение расходов концентрата. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 53–73.

