

Совершенствование систем обратного осмоса, используемых для питьевого и технического водоснабжения

Алексей Германович Первов, Дмитрий Владимирович Спицов, Тет Зо Аунг,
Анна Сергеевна Кулагина

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводятся результаты новых исследований, проведенных для повышения эффективности получения питьевой воды. Экспериментально обоснованы новые технологические решения, позволяющие избежать осадкообразования на мембранах, сократить затраты на предочистку и радикально уменьшить сброс концентрата. Показано, как использование нанофильтрационных мембран с низкими селективными характеристиками дает возможность сократить эксплуатационные затраты, связанные с закупкой реагентов для предочистки и химических промывок и оплатой сброса концентрата в канализацию.

Материалы и методы. Экспериментально определены все технические параметры систем водоподготовки, включая: типы мембран и моделей мембранных элементов; число мембранных аппаратов на каждой ступени; рабочее давление; режимы проведения гидравлических и химических промывок; дозы реагентов. Представлены результаты обработки подземной воды с применением мембран в первой серии экспериментов, а также итоги исследования взаимосвязи между коэффициентом снижения объема K , общим солесодержанием и концентрацией кальция. Изучена зависимость снижения эффективности мембран от коэффициента K . Результаты второй серии экспериментов демонстрируют зависимости скоростей роста осадка карбоната кальция в мембранных элементах на первом и втором этапах очистки.

Результаты. На основании обработки экспериментальных данных представлены результаты расчетов количества мембранных элементов стандарта 8040 на каждой ступени очистки для установки производительностью 3 м³/ч, а также получены результаты экономических расчетов.

Выводы. Использование нанофильтрационных мембран на каждой ступени очистки позволяет избежать осадкообразования на мембранах и уменьшить затраты на эксплуатацию за счет отказа от ингибиторов и моющих растворов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, ингибиторы осадкообразования, осадкообразование на мембранах, сокращение расхода концентратов, снижение жесткости, установка обратного осмоса

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Первов А.Г., Спицов Д.В., Аунг Т.З., Кулагина А.С. Совершенствование систем обратного осмоса, используемых для питьевого и технического водоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1354–1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1354-1372

Автор, ответственный за переписку: Анна Сергеевна Кулагина, anya.k.11@yandex.ru.

Improvement of reverse osmosis systems used for drinking and technical water supply

Alexei G. Pervov, Dmitriy V. Spitsov, Htet Zow Aung, Anna S. Kulagina

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The present paper shares new results of research devoted to improving the operation of conventional reverse osmosis. A new technological solution is proposed to escape scaling on the membrane surface. Applications of nanofiltration membranes provide a reduction of operation costs connected with chemical purchases to ensure pretreatment and chemical cleaning and also to pay for concentrate discharge into the sewer.

Materials and methods. In the paper, the experimental methods developed earlier were used, such as the evaluation of membrane rejection and control of permeate quality as a function of the initial feed water volume reduction coefficient K ; evaluation of calcium carbonate scaling rates and organic fouling rates in membrane modules. The experimentally obtained relationships are presented: dependencies of calcium concentrations and TDS values on the initial volume reduction coefficient K values and product flow reduction with K value relationships. Also, the second series results are presented that demonstrate dependencies of calcium carbonate growth rates on K .

Results. Results of the required numbers of membrane modules are obtained to tailor the 3 cubic metres per hour capacity membrane facility and the results of economic calculations are also obtained.

Conclusions. The use of nanofiltration membranes on each stage of water treatment allows for the escape of deposition of sparingly soluble salts on the membrane surface and excludes antiscalant dosing and routine membrane cleanings. The use of the developed technology featured by the low operational cost due to reduced reagent consumption and concentrate discharge into the sewer.

KEYWORDS: reverse osmosis, nanofiltration, scaling on membranes, membrane fouling, antiscalant, reduction of concentrate discharges, water softening, reverse osmosis plant

FOR CITATION: Pervov A.G., Spitsov D.V., Aung H.Z., Kulagina A.S. Improvement of reverse osmosis systems used for drinking and technical water supply. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1354-1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1354-1372 (rus.).

Corresponding author: Anna S. Kulagina, anya.k.11@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время без мембран обратного осмоса и нанофильтрации невозможно представить развитие питьевого водоснабжения [1–4]. Это вызвано тем, что:

1. Мембраны одновременно задерживают ионы жесткости и железа, что необходимо при кондиционировании подземной воды.

2. Мембранная фильтрация эффективно удаляет из подземных вод ионы фтора, аммония, лития и стронция. Это свойство мембранных систем позволяет использовать для хозяйственно-питьевого водоснабжения ранее непригодные для потребления подземные воды.

3. Мембраны эффективно задерживают растворенные органические загрязнения, дают возможность без применения реагентов снизить цветность и окисляемость воды.

4. Сегодня в мировой практике мембраны находят активное применение на крупных станциях питьевого водоснабжения. Это связано с малой эффективностью существующих коагуляционных технологий снизить цветность, а также необходимостью убрать из воды продукты хлорирования и озонлиза. Мембраны используются в этом случае как простой метод, позволяющий без реагентов и расходных материалов удалить растворенные органические вещества с низким молекулярным весом вместо применения озонсорбции.

5. Важной новой областью применения мембран являются системы автономного водоснабжения удаленных жилых объектов. В этих случаях от мембран требуется одновременное решение проблем подготовки качественной питьевой воды, воды для горячего водоснабжения и отопления, а также контуров охлаждения (кондиционирования) и увлажнения воздуха.

Быстрому и эффективному внедрению этого эффективного метода в практику питьевого водоснабжения мешает ряд предубеждений, сложившихся в период, когда строительство и эксплуатация мембранных систем делали только первые шаги. Эти предубеждения основаны на следующих понятиях:

1. Обратноосмотические мембраны производят обессоленную воду с низким содержанием жестко-

сти и ряда компонентов, делая воду гигиенически «неполноценной».

2. Системы обратного осмоса требуют высоких эксплуатационных затрат на предочистку и предотвращение осадкообразования на мембранах.

3. Системы обратного осмоса разделяют воду на пермеат (очищенную воду) и концентрат. До сих пор не решена проблема: куда девать сбросные потоки концентрата, которые составляют до 30 % от расходов очищаемой воды.

Исследования, проведенные на кафедре водоснабжения и водоотведения Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), привели к разработке инновационных технологических решений. Эти исследования направлены на эффективное решение ключевых задач обеспечения населения чистой питьевой водой высокого качества [5, 6]:

1. При очистке подземных вод предлагается более совершенная технология очистки, умягчения и обессоливания воды с использованием нанофильтрационных мембран. Благодаря низким значениям селективности нанофильтрационных мембран по одновалентным ионам при обработке воды удастся избежать образования на мембранах осадков малорастворимых солей и не применять в технологии ингибиторы образования солевых отложений, что позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты. Применение нанофильтрационных мембран открывает возможности для решения актуального вопроса, связанного с качеством питьевой воды, который не может быть эффективно решен с помощью технологии обратного осмоса — это управление ионным составом очищенной воды. В тех ситуациях, когда концентрация трудноудаляемых из воды загрязнений, представленных однозарядными ионами (таких как, например, литий или аммоний), в исходной воде превышает нормативные значения в 10 и более раз, а жесткость воды имеет невысокое значение, можно получить очищенную воду с оптимальным составом: заданным значением лития и увеличенной жесткостью. Эту технологию назвали «технологией разделения ионов» [6].

2. Используя мембранную технологию для очистки поверхностных вод, возможно решить задачу уда-

ления загрязнений из фугата, образующегося в процессе обезвоживания осадка [6].

3. В процессе очистки поверхностной воды методом нанофильтрации образующийся концентрат подвергается совместной утилизации с обезвоженным осадком. Смешивание концентрата с осадком, направляемым на обезвоживание, осуществляется в осадкоуплотнителе. В результате обезвоживания получается осадок влажностью 80 % и фугат. Фугат смешивается с водой после отстаивания осадка в осадкоуплотнителе и направляется на мембранную установку для разделения на пермеат и концентрат. Пермеат представляет собой очищенную воду. Концентрат возвращается в осадкоуплотнитель. Расход концентрата соответствует расходу воды, который находится в обезвоженном осадке и выводится из системы очистки. Благодаря такой схеме все загрязнения, поступающие в осадкоуплотнитель с осадком и концентратом, удаляются вместе с осадком.

4. Разработанная авторами технология «разделения ионов» дает возможность управлять ионным составом очищенной воды, увеличивая жесткость и солесодержание очищенной воды и при этом позволяя увеличить кратность объемного концентрирования и сократить объем концентрата, удаляемого с осадком.

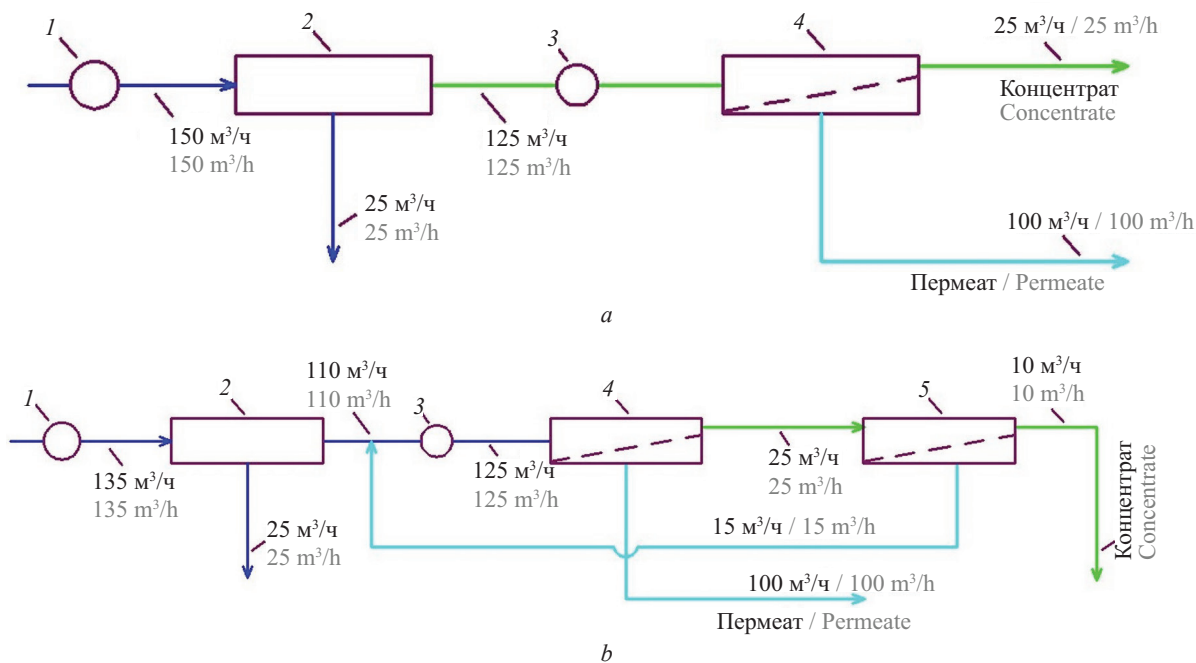
5. Технология «разделения ионов» — эффективный метод для выделения раствора хлорида натрия из концентратов мембранных установок. Полученный концентрированный раствор хлорида натрия может быть использован в качестве сырья для получения гипохлорита посредством электролитического метода.

6. В ряде случаев при создании систем питьевого водоснабжения оказывается невозможным сброс сточных вод, образующихся при очистке воды — фу-

гатов после обезвоживания, вод промывки фильтров, концентратов мембранных установок. Это имеет место в случаях, когда станция очистки располагается вблизи водозабора и удалена от городских сетей водоотведения. Для этих случаев разработана технология глубокого сокращения расхода концентрата с выделением из него осадка карбоната кальция и гидроокиси железа и вывоза твердых отходов (обезвоженных осадков) автотранспортом [6].

Расходы на реагенты — существенная составляющая затрат на технологию обратного осмоса. Помимо расходов на предварительную очистку воды, значительная часть затрат на технологию обратного осмоса связана с приобретением реагентов. К ним относятся ингибиторы образования малорастворимых солей, добавляемые в исходную воду, а также реагенты для проведения химических промывок и растворения отложений, накапливающихся на мембранах.

Сокращение расхода концентрата осуществляется с помощью нанофильтрационных мембран. Благодаря низкой селективности нанофильтрационных мембран по одновалентным ионам удастся решить сразу две задачи: сократить расход концентрата и при этом избежать интенсивного образования осадков малорастворимых солей на мембранах [5–15]. На рис. 1, *b* представлена схема сокращения расхода концентрата установки обратного осмоса. Данная схема предусматривает использование дополнительной ступени очистки концентрата с применением нанофильтрационных мембран. Первая ступень мембранной установки обеспечивает получение воды заданного качества. Образующийся при этом концентрат поступает во вторую ступень, где подвергается обработке нанофильтрационными мембранами. На второй ступени происходит разделение концентрата на пермеат и новый концентрат. Низкая селек-



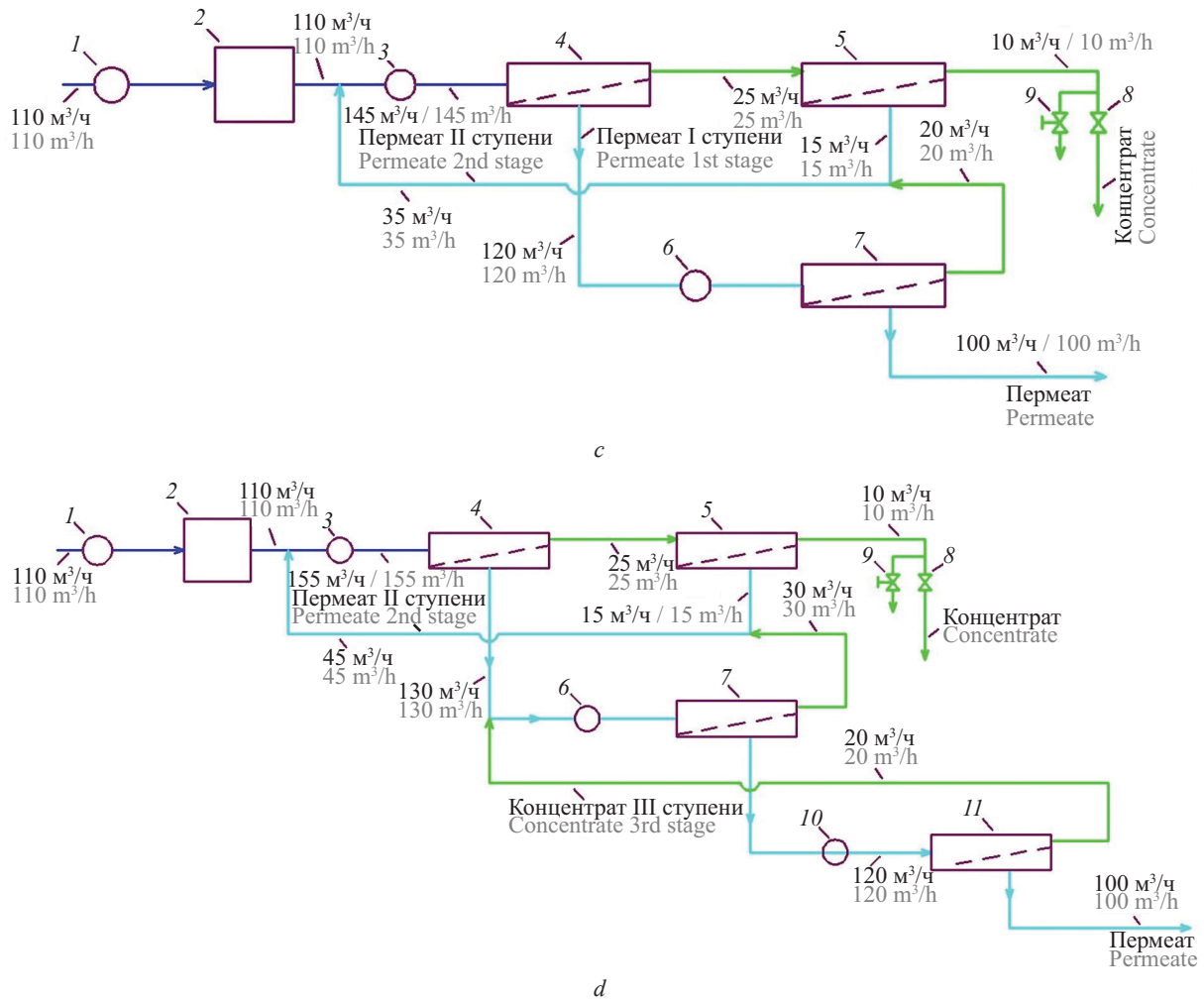


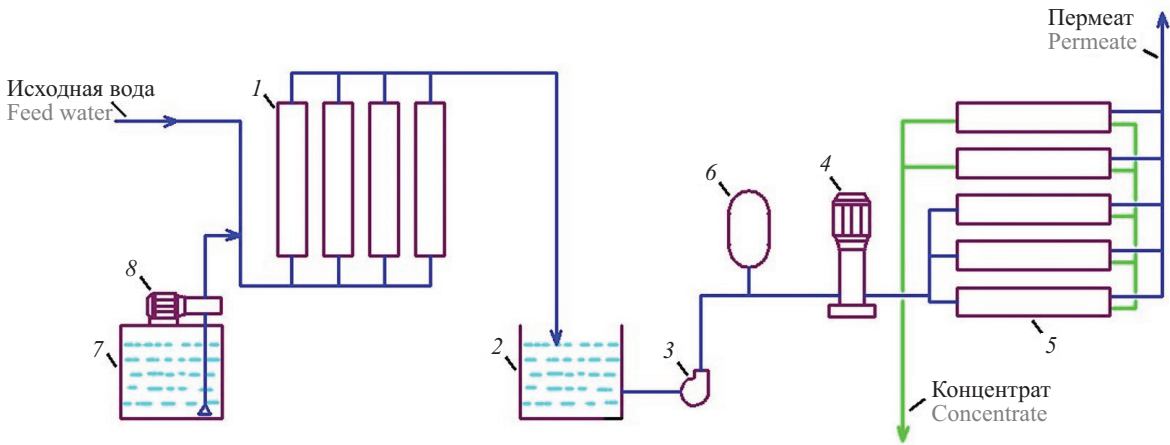
Рис. 1. Балансовые схемы установок обратного осмоса: *a* — традиционная схема с предочисткой и сбросом концентрата; *b* — схема с уменьшенным расходом концентрата за счет установки блока нанофильтрации на концентрате; *c* — новая разработка с применением нанофильтрационных мембран с «открытым каналом» в две ступени; *d* — новая схема с применением нанофильтрационных мембран в три ступени для случая специальных требований по глубине обессоливания исходной воды; 1 — бустерный насос исходной воды; 2 — предочистка; 3 — рабочий насос высокого давления первой ступени; 4 — мембранные аппараты первой ступени; 5 — нанофильтрационные аппараты сокращения расхода концентрата первой ступени; 6 — рабочий насос высокого давления второй ступени; 7 — мембранные аппараты второй ступени; 8 — вентиль регулирования давления концентрата; 9 — кран гидравлической промывки; 10 — рабочий насос третьей ступени; 11 — мембранный аппарат третьей ступени

Fig. 1. Flow diagrams of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities: *a* — conventional scheme with pretreatment and concentrate discharge; *b* — the scheme with reduced concentrate discharge due to the use of nanofiltration membrane unit on the concentrate stream; *c* — the new double-stage technological scheme with simplified pretreatment and concentrate reduction using the “open channel” membrane modules; *d* — the new three-stage membrane scheme using nanofiltration membranes to produce low TDS and softened water; 1 — booster pump for the feed water; 2 — pretreatment system; 3 — high pressure pump for the first membrane stage; 4 — first stage membrane modules; 5 — nanofiltration membrane modules to reduce first stage concentrate flow; 6 — second stage high pressure pump; 7 — second stage membrane modules; 8 — pressure regulation valve; 9 — hydraulic flushing valve; 10 — third stage high pressure pump; 11 — third stage membrane modules

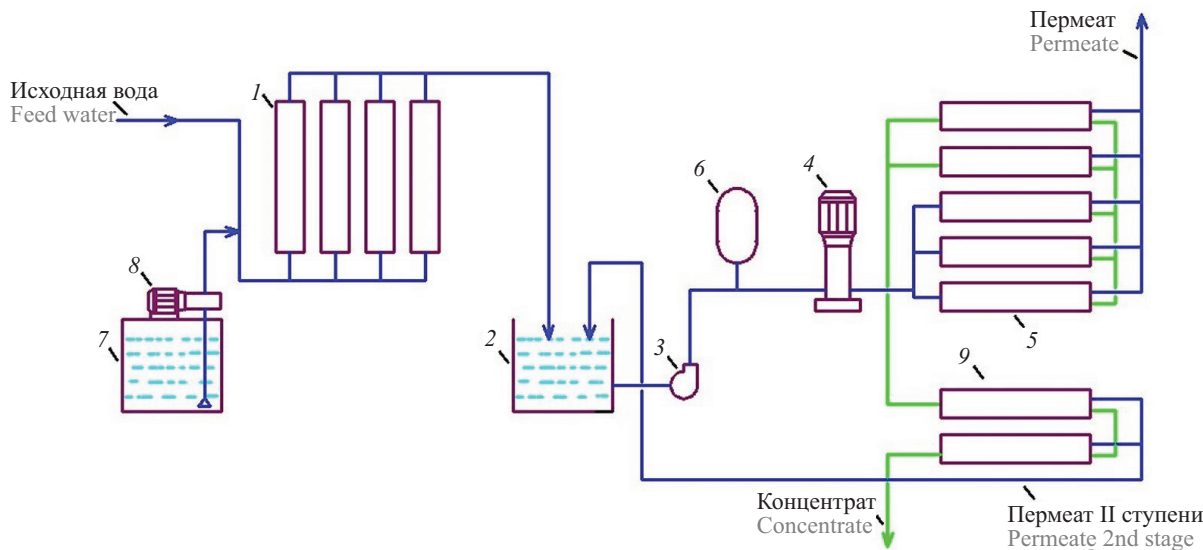
тивность нанофильтрационных мембран приводит к тому, что ионный состав пермеата второй ступени приближается к составу исходной воды. По этой причине пермеат второй ступени направляется обратно в установку и смешивается с исходной водой. Использование данной схемы позволяет уменьшить расход концентрата в 3–6 раз по сравнению с одно-ступенчатой схемой.

Схема, показанная на рис. 1, *b*, дает возможность сократить расход концентрата, но не позволяет сократить расходы на предочистку и реагенты (ингибитор и моющие растворы) [16].

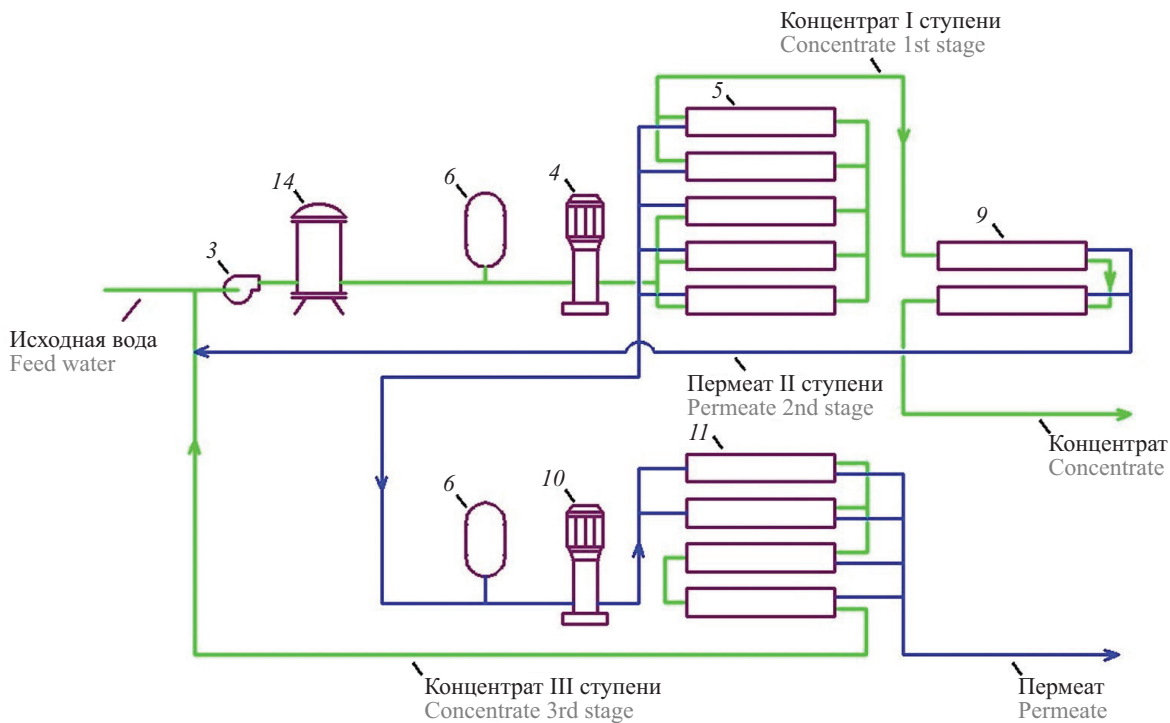
В настоящей работе авторами рассматривается применение новых технологий, основанных на использовании мембранных аппаратов с «открытым» каналом [6]. Применение аппаратов традиционной



a



b



c

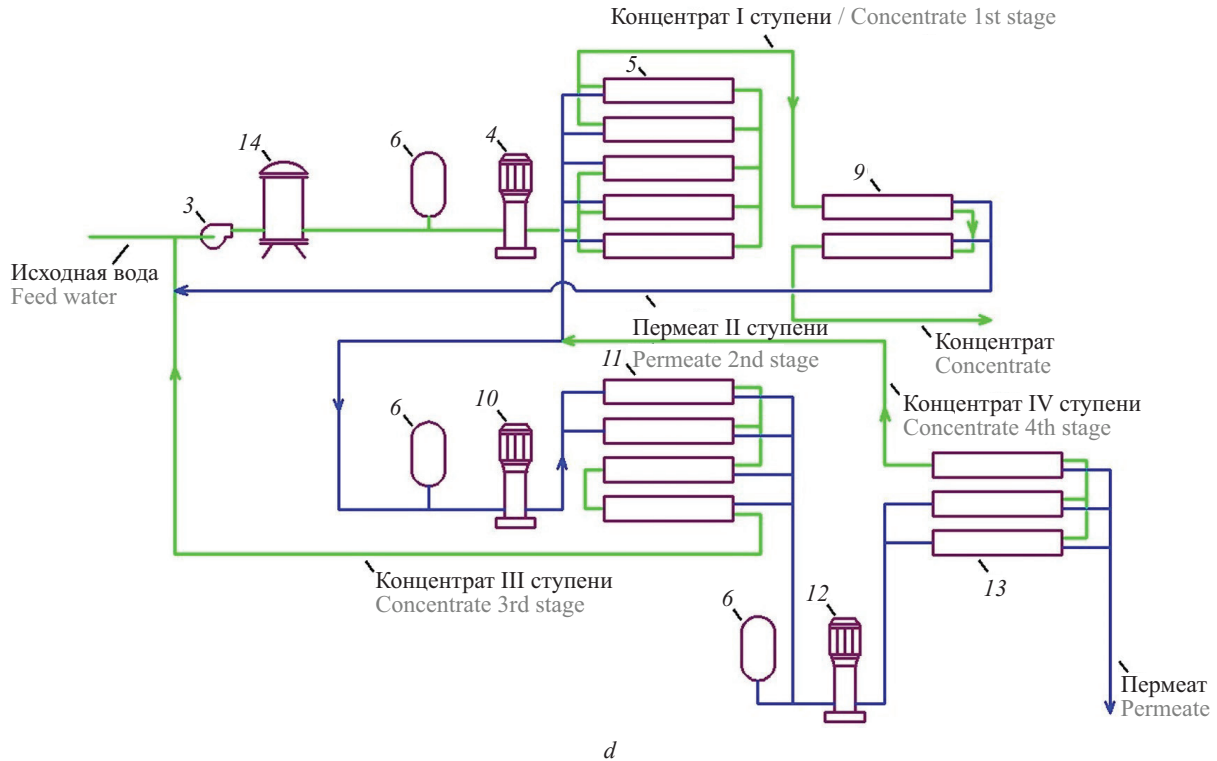


Рис. 2. Гидравлические схемы мембранных установок, представленных на рис. 1: *a* — традиционная схема установок обратного осмоса; *b* — установка со ступенью сокращения расхода концентрата; *c* — новая разработка: двухступенчатая схема с применением нанофильтрационных аппаратов с «открытым каналом»; *d* — трехступенчатая схема с нанофильтрационными аппаратами для случая особо жестких требований по глубине обессоливания; 1 — ультрафильтрация для предочистки; 2 — промежуточный бак осветленной воды; 3 — бустерный насос подачи осветленной воды на мембранную установку; 4 — рабочий насос высокого давления; 5 — мембранные аппараты первой ступени; 6 — бак-гидроаккумулятор; 7 — бак дозирования коагулянта; 8 — насос-дозатор коагулянта; 9 — мембранные аппараты сокращения расхода концентрата первой ступени; 10 — рабочий насос второй ступени; 11 — мембранные аппараты второй ступени; 12 — рабочий насос третьей ступени; 13 — мембранные аппараты третьей ступени; 14 — патронный (или дисковый) фильтр предочистки

Fig. 2. Hydraulic diagrams of membrane units shown in Fig. 1: *a* — traditional diagram of reverse osmosis units; *b* — unit with a stage of concentrate flow reduction; *c* — new development: two-stage diagram using nanofiltration units with an “open channel”; *d* — three-stage diagram with nanofiltration units for the case of particularly stringent requirements for the depth of desalination; 1 — ultrafiltration system for pre-treatment; 2 — intermediate tank for clarified water; 3 — booster pump for feeding clarified water to the membrane unit; 4 — high-pressure working pump; 5 — first-stage membrane units; 6 — hydraulic accumulator tank; 7 — coagulant dosing tank; 8 — coagulant dosing pump; 9 — first-stage membrane units for concentrate flow reduction; 10 — second-stage working pump; 11 — second stage membrane devices; 12 — third stage working pump; 13 — third stage membrane devices; 14 — cartridge (or disk) pre-filter

конструкции (с турбулизаторной сеткой в канале) вызывает быстрое увеличение сопротивления канала при образовании отложений коллоидных, взвешенных и органических веществ и, как следствие, быструю потерю мембранами производительности. Использование в аппаратах нанофильтрационных мембран с низким значением селективности позволяет избежать образования застойных зон и интенсивного образования осадков малорастворимых солей [17, 18]. Нанофильтрационные мембранные в аппарате с «открытым» каналом позволяют не применять ингибиторы образования осадков малорастворимых солей. Работа установок, использующих аппараты с «открытым каналом» и нанофильтрационные мембраны, показана на рис. 1, с.

Вместо применения обратноосмотических мембран, обеспечивающих снижающие концентрации ионов жесткости в 30–50 раз, используются нанофильтрационные мембраны в две ступени, каждая из которых снижает жесткость в 4–10 раз. Низкая селективность нанофильтрационных мембран предотвращает пересыщение раствора и последующее осаждение карбоната кальция в каналах мембранных элементов. В случае образования осадков взвешенных и коллоидных частиц на первой ступени очистки система автоматически запускает гидравлические промывки со сбросом давления (рис. 1, с). «Открытая» структура каналов с увеличенным живым сечением потока обеспечивает минимальное

гидравлическое сопротивление, что способствует эффективности промывок со сбросом давления.

Показанная на рис. 1, с схема дает только общие представления о работе мембранной технологии. В зависимости от величины жесткости воды, значения общего солесодержания, расхода концентрата, глубины умягчения и других требований количество ступеней и модели используемых мембранных аппаратов могут быть изменены. При необходимости получения глубоко умягченной воды в схеме (рис. 1, с) могут быть применены низконапорные обратноосмотические мембраны, что потребует использования в технологии ингибиторов для предотвращения образования осадков карбоната кальция. Для сокращения расходов на реагенты решено использовать нанофильтрационные мембранные аппараты не в две, а в три ступени (рис. 1, d). Целесообразность применения таких решений определяется на основе проведения технико-экономического обоснования [19, 20]. На рис. 2 приведены схемы установок, представленных на рис. 1, с указанием насосов и мембранных аппаратов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основная цель экспериментов состояла в определении всех технических параметров мембранной водоочистной установки, позволяющих получить воду заданного качества. В процессе экспериментов установлены:

- модели мембранных аппаратов и требуемые показатели их селективности;
- необходимая площадь поверхности мембран на каждой ступени очистки;

• определенное рабочее давление на каждой ступени;

• периодичность выполнения гидравлических прочисток с разгрузкой давления и продолжительность этих процедур;

• объем реагентов, необходимых для проведения химических промывок на каждом этапе;

• дозы ингибиторов для случаев использования на второй ступени мембран с высокой селективностью.

Рис. 3 демонстрирует схему экспериментальной установки.

Использовались разработанные ранее методики [4–6]:

1. Определение состава пермеата и концентрата в зависимости от коэффициента снижения объема.

2. Определение влияния солесодержания обрабатываемой воды и коэффициента снижения объема исходной воды на производительность мембранного элемента. Коэффициент снижения объема устанавливается как отношение расхода исходной воды, поступающей в мембранный аппарат, к расходу концентрата.

3. Определение скоростей образования отложений на мембранах.

Исходная вода из емкости 1 под воздействием насоса 2 поступала в мембранный аппарат (рис. 3), где подвергалась процессу разделения на две составляющие: пермеат — очищенную воду, прошедшую через мембрану; концентрат — поток воды, содержащий все примеси, задержанные мембраной. Концентрат возвращался в емкость 1, а пермеат направлялся в баки 4 и 5 в соответствии с величиной коэффициента K . Для измерения рабочего давления

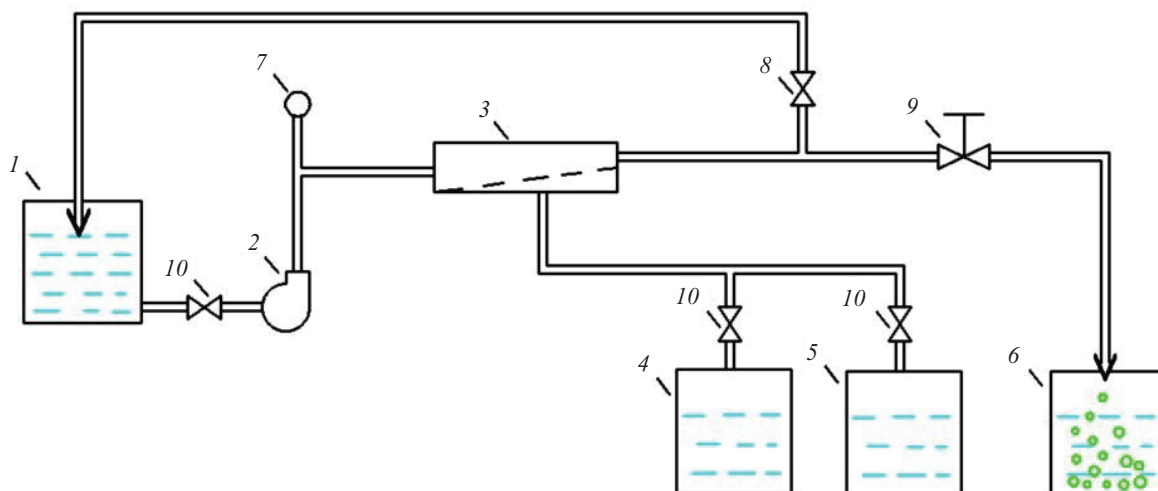


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — бак исходной воды; 2 — рабочий насос; 3 — мембранный аппарат; 4, 5 — баки сбора пермеата; 6 — бак сбора концентрата после гидравлической промывки; 7 — манометр; 8 — регулирующий клапан; 9 — клапан сброса давления при гидравлической промывке; 10 — шаровые краны

Fig. 3. Flow diagram of membrane test unit: 1 — feed water tank; 2 — rotary pump; 3 — membrane spiral wound module in the plastic pressure vessel; 4, 5 — product water collection tanks; 6 — concentrate collection tank after hydraulic washing; 7 — pressure gauge; 8 — pressure regulation valve; 9 — hydraulic flushing valve; 10 — shut-off valves

в аппарате 2 применялся манометр 7. В ходе экспериментальной работы использовались мембранные рулонные элементы стандарта 1812 с обратноосмотическими мембранами типа BLN, нанофильтрационными мембранами типа 70 NE производства компании TORAY (Япония) и нанофильтрационными мембранами nanoNF производства компании «Рос-Нанотех» (г. Владимир, Российская Федерация).

Целью экспериментальных исследований являлось получение воды, пригодной для использования в водогрейных котлах, из подземного источника с высокой общей жесткостью (не менее 8–9 мг-экв/л). Для достижения требуемого уровня жесткости воды для водогрейных котлов (150 мкг-экв/л) необходимо снизить первоначальную жесткость подземной воды в 40–50 раз.

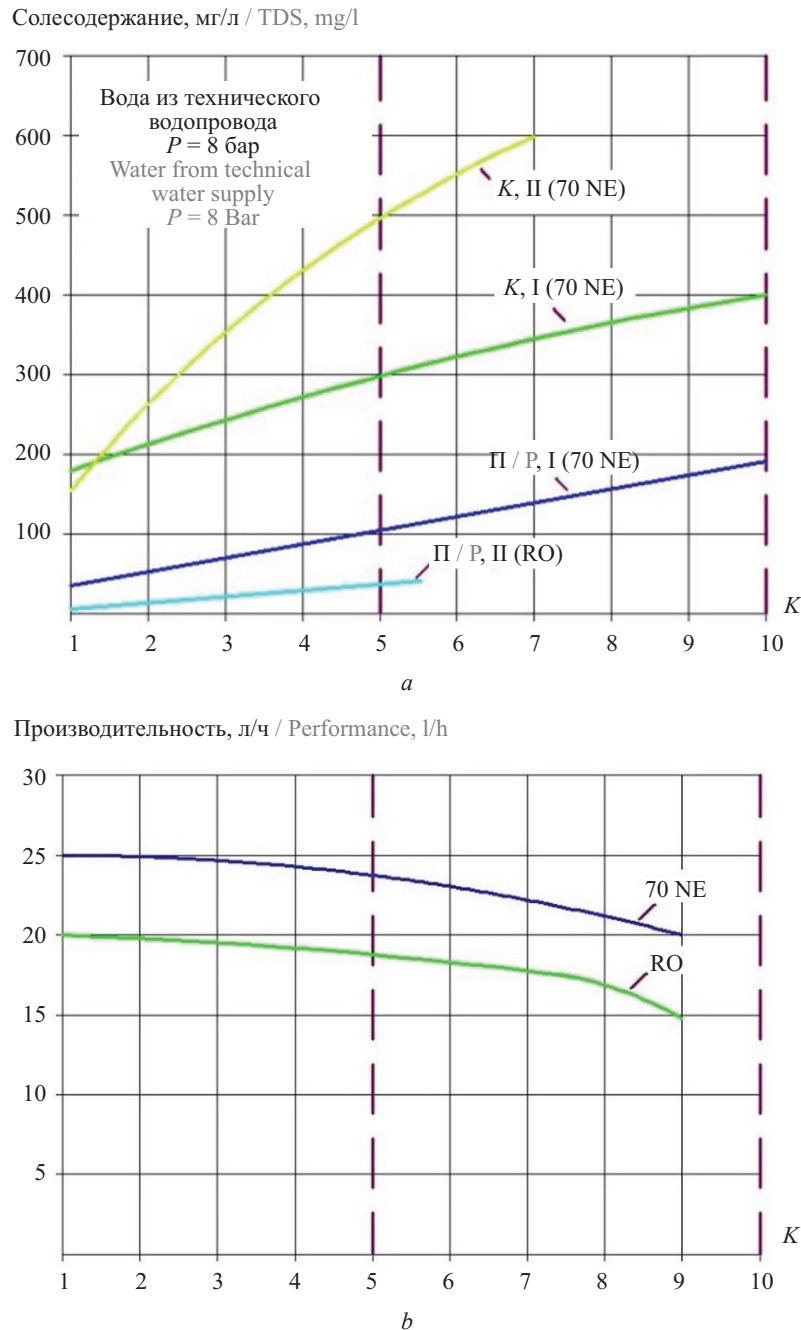


Рис. 4. Исследование эффективности очистки воды, полученной из технического водопровода: *a* — зависимость общего содержания солей в пермеатах и концентратах различных мембран на различных этапах очистки; *b* — зависимость снижения производительности мембранных элементов от *K*

Fig. 4. Experimental results. Efficiency of water purification from industrial water supply: *a* — dependences of the value of total salt content of permeates and concentrates of various membranes at different stages of purification; *b* — dependences of the decrease in the productivity of membrane elements on *K*

Табл. 1. Результаты обработки воды из водопровода с применением мембран nanoNF

Table 1. Results of water treatment using nanoNF membranes

Показатели Indicators	Исходная вода Feed water	Пермеат I ступень 1st stage permeate	Пермеат II ступень 2nd stage permeate	Пермеат III ступень 3rd stage permeate	Концентрат, $K = 10$ Concentrate, $K = 10$
Кальций, мг-экв/л Calcium, meq/l	3,6	0,8	0,25	<0,1	28,0
Магний, мг-экв/л Magnesium, meq/l	0,55	0,24	0,08	<0,1	3,0
Общая жесткость, мг-экв/л Hardness, meq/l	4,15	1,04	0,25	<0,1	31,0
Хлороформ, мг/л Chloroform, mg/l	11	5,1	2,7	1,3	98,1
Сульфаты, мг/л Sulfates, mg/l	28	4,4	0,9	0,2	271
Бикарбонаты, мг-экв/л Bicarbonates, meq/l	4,1	1,2	0,5	0,24	29,2
Натрий + калий, мг/л Sodium + potassium, mg/l	19,1	10,4	6,2	2,9	92,0
Железо, мг/л Iron, mg/l	1,5	0,2	—	—	13,0
Общее солесодержание, мг/л TDS, mg/l	320	124	50	18	1810
pH	7,5	7,2	7,0	6,9	7,6

В ходе экспериментального исследования сравнивались две технологические схемы очистки воды, предусматривающие применение различных типов мембран. В рамках первой схемы первичная обработка воды осуществлялась с помощью нанофильтрационных мембран марки nanoNF, а последующая очистка — с применением обратноосмотических мембран марки BLN.

Согласно второй схеме обработки воды, на начальном этапе применялись нанофильтрационные мембраны типа 70 NE, а на последующем этапе — обратноосмотические мембраны типа BLN.

Рис. 4, *a* демонстрирует корреляцию между общим содержанием солей в концентрате и пермеате и значением коэффициента K на первой и второй стадиях процесса. Рис. 4, *b* иллюстрирует зависимость производительности мембран на первой и второй ступенях очистки от значения коэффициента K .

В табл. 1 приведены результаты обработки воды из водопровода с применением мембран nanoNF.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментальных исследований, проводившихся в рамках двух серий, оценивалась эффективность мембранных элементов nanoNF для уменьшения общей жесткости воды при их ис-

пользовании на различных стадиях многоступенчатой очистки. Первая серия экспериментов была посвящена изучению эффективности применения мембран nanoNF на первой, второй и при необходимости третьей ступени очистки. Во второй серии экспериментов исследовалась эффективность использования нанофильтрационных мембран 70 NE на первой и второй ступенях очистки. Эффективность применения обратноосмотических мембран BLN на второй ступени очистки оценивалась в рамках обеих серий исследований (рис. 4). Следует отметить, что, помимо эффективности снижения жесткости, критически важна стойкость мембранных элементов к образованию осадков солей жесткости (преимущественно карбоната кальция). На рис. 5 представлены результаты определения скоростей образования осадка карбоната кальция в установках с мембранами nanoNF и 70 NE на различных стадиях многоступенчатой очистки. Для выявления интенсивности образования на различных мембранах осадков карбоната кальция использовалась методика, описанная в работе [19]. Полученные в результате проведения экспериментов зависимости концентраций ионов кальция в концентратах различных мембранных аппаратов на первой, второй и третьей ступенях очистки в зависимости от значения коэффициента снижения объема исходной воды K показаны на рис. 6.

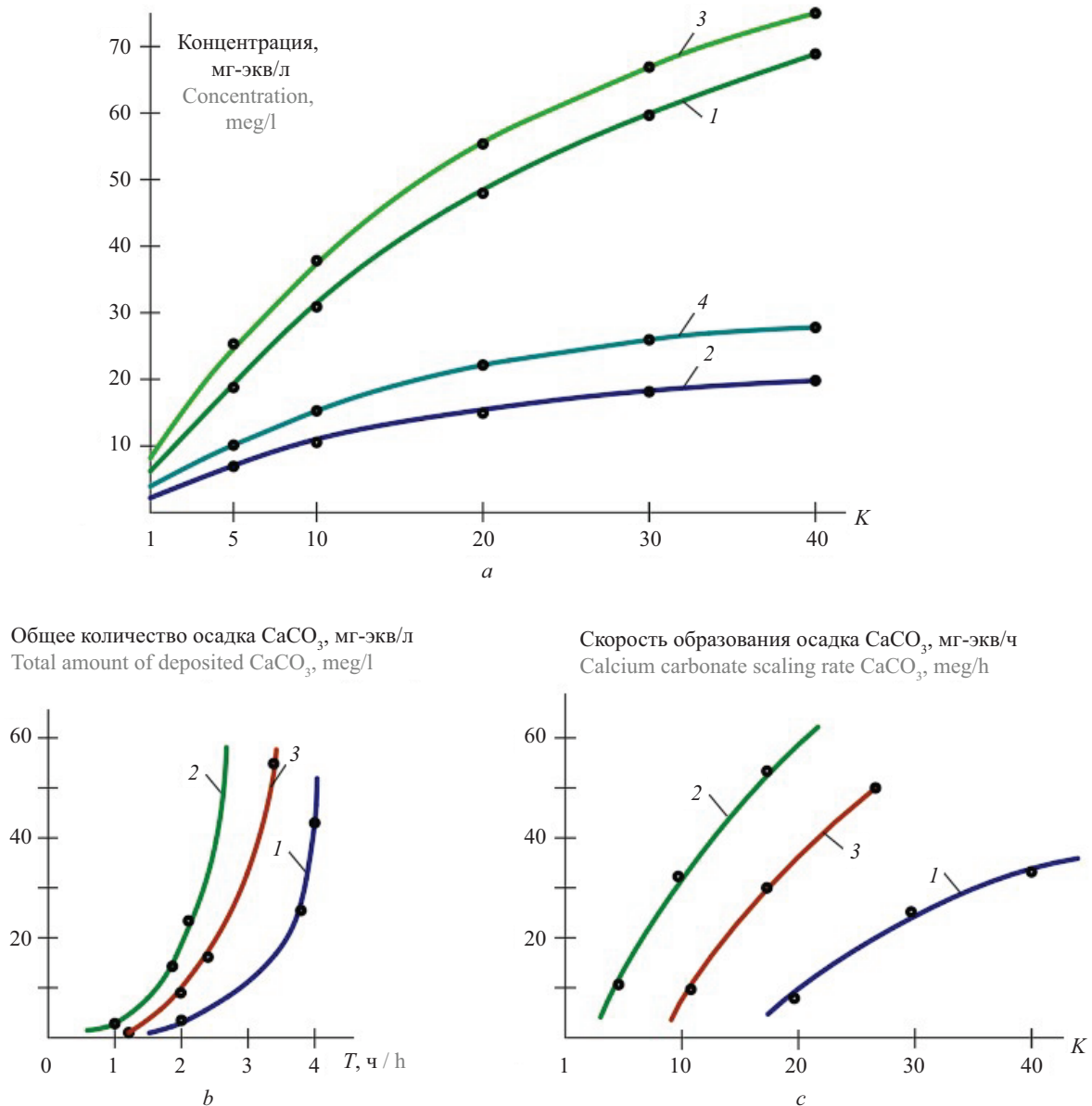


Рис. 5. Определение скоростей осадкообразования карбоната кальция в аппаратах с мембранами nanoNF и 70 NE: a — зависимости концентраций ионов кальция и бикарбонат-ионов от K ; b — зависимости общего количества образовавшегося осадка от времени эксперимента; c — зависимости скоростей роста осадка от K ; 1 — мембраны nanoNF; 2 — мембраны 70 NE

Fig. 5. Determination of calcium carbonate precipitation rates in devices with nanoNF and 70 NE membranes: a — dependence of calcium and bicarbonate ion concentrations on K ; b — dependence of the total amount of formed precipitation on the time of the experiment; c — dependence of the precipitation growth rates on K ; 1 — nanoNF membranes; 2 — 70 NE membranes

На рис. 7 изображена методика определения необходимой площади поверхности мембранных элементов на каждом этапе очистки. Данный метод основан на экспериментальных данных, устанавливающих зависимость производительности мембранного элемента от коэффициента снижения объема K .

В двух диапазонах изменения K (от 1 до 5) и (от 5 до 10) выбираем среднее значение производительности мембранного элемента. Выбираем на рис. 1 балансовую схему установки (в нашем случае рис. 1, с) и делаем расчет установки производительностью $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, при этом все показатели

расходов на балансовой схеме следует разделить на 10. Принимая во внимание тот факт, что площадь мембран в стандартном мембранном элементе модели 1812 составляет $0,5 \text{ м}^2$, для определения площади мембран nanoNF, используемых на первой ступени, необходимо разделить расход аппаратов первой ступени на удельную производительность одного элемента, $\text{л}/\text{ч} \cdot \text{м}^2$. Аналогичным образом вычисляется требуемая площадь мембран BLN на второй ступени. В случае необходимости уменьшения расхода концентрированного раствора рассчитывается требуемое количество мембранных аппаратов

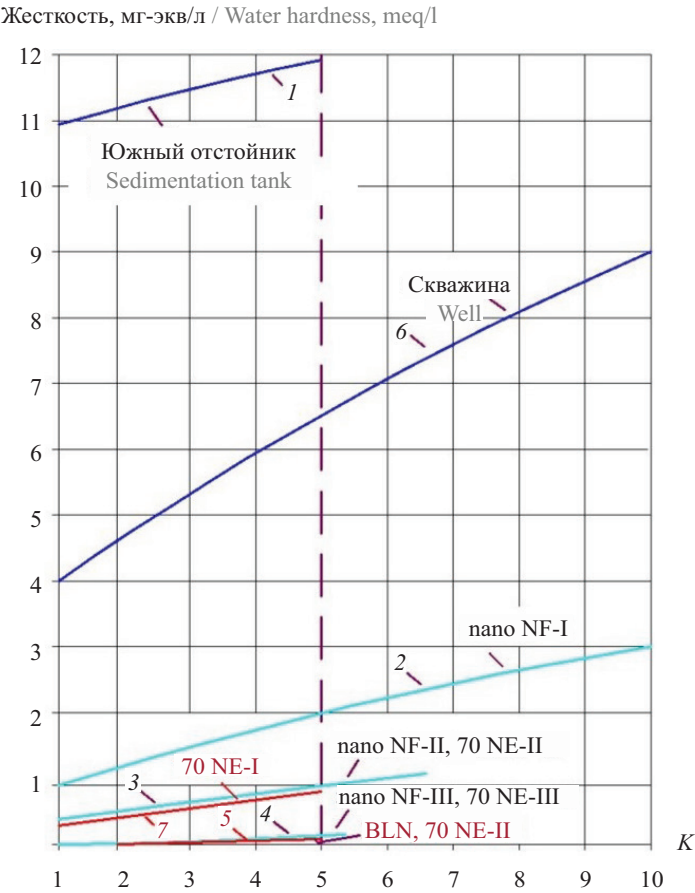


Рис. 6. Результаты определения общей жесткости в пермеатах различных мембран на разных ступенях очистки
Fig. 6. Results of determining the total hardness in permeates of different membranes at different stages of purification

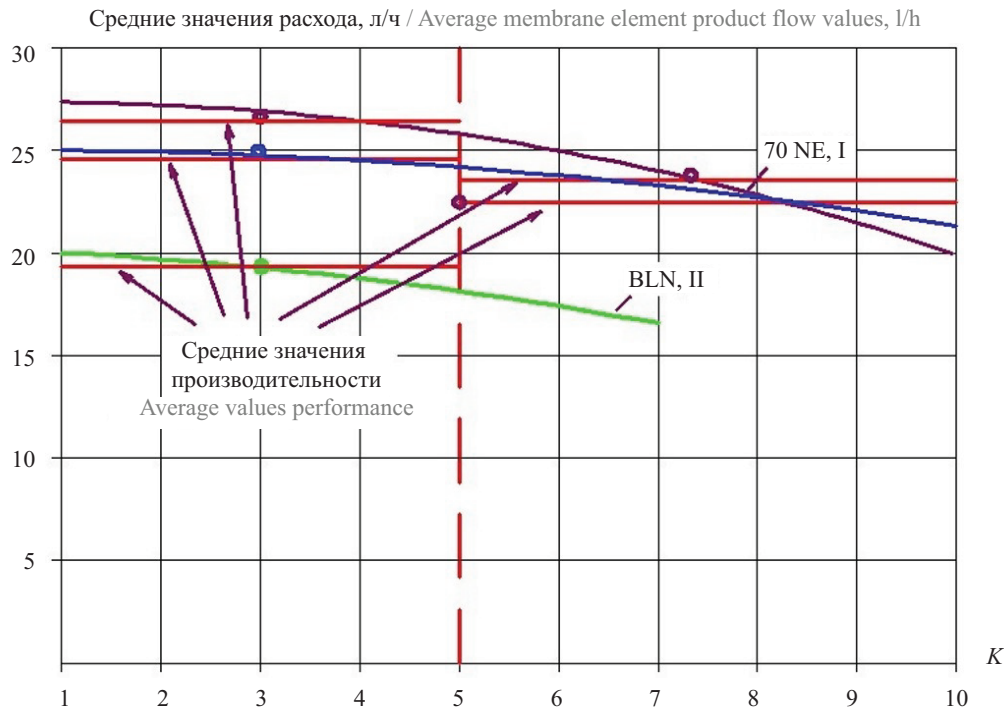


Рис. 7. Определение величин средней производительности мембранных элементов на разных ступенях очистки для расчета требуемого количества мембранных элементов
Fig. 7. Determination of the average performance values of membrane elements at different stages of purification for calculating the required number of membrane elements

типа 8040 с мембранами nanoNF, устанавливаемых на третьей ступени (для минимизации расхода концентрированного раствора).

Табл. 2 демонстрирует результаты расчета необходимой площади поверхности мембран для каждой ступени и количества мембранных аппаратов, используемых на каждой ступени. Расчеты выполнены для технологических схем мембранных установок, представленных на рис. 1, с; 2, с. Выбор типа мембран для каждой ступени осуществлен на основе анализа их эффективности в снижении общей жесткости воды. В рамках решения поставленной задачи авторы рассмотрели три варианта возможных технологических схем:

1. Схему с мембранами nanoNF на первой ступени и обратноосмотическими мембранами BLN на второй ступени. Эффективность схемы для получения высококачественной умягченной воды, отвечающей требованиям подачи воды в водогрейные котлы, не вызывает сомнений. Опасение вызывает необходимость дозирования в исходную воду второй ступени ингибитора образования осадка карбоната кальция, что снижает надежность работы установки и, как будет показано ниже, существенно увеличивает эксплуатационные затраты.

2. Схему с мембранами 70 NE на первой ступени и на второй ступени. Такая схема также требует дозирования ингибитора осадкообразования в исходную воду. Однако, как показал опыт применения мембран 70 NE, интенсивность осадкообразования в аппаратах с этими мембранами оказывается значительно ниже, чем в аппаратах с обратноосмотическими мембранами. При этом нанофильтрационные мембраны работают при низком давлении (8 бар), что также сказывается на величине эксплуатационных затрат.

3. Представляет интерес использовать трехступенчатую схему (рис. 1, d; 2, d). Возможно на каждой ступени применять мембраны nanoNF, в которых образование карбоната кальция в исследуемом диапазоне составов воды исключено.

С целью экономического обоснования выбора мембран для подготовки воды для водогрейных котлов рассматривались три схемы:

1) двухступенчатая схема: первая ступень включает использование нанофильтрационных мембран типа nanoNF; вторая ступень оснащена обратноосмотическими мембранами типа BLN;

2) двухступенчатая схема: обе ступени очистки реализованы с применением нанофильтрационных мембран типа 70 NE;



a



b

Рис. 8. Общий вид нанофильтрационной системы «нового поколения» с тремя ступенями очистки для производства питьевой воды, горячей воды и воды для питания водогрейных котлов производительностью 3 м³/ч (рис. 1, d; рис. 2, d; табл. 2)

Fig. 8. General view of the “new generation” nanofiltration system with three purification stages for the production of drinking water, hot water and water for feeding hot water boilers with a capacity of 3 m³/hour (Fig. 1, d; 2, d; Table 2)

Табл. 2. Расчет основных эксплуатационных затрат для установки подготовки воды для котельных 1 и 2 из воды технического водопровода
Table 2. Calculation of basic operating costs for a unit with a capacity of 3 cubic metres per hour for preparing water for Boiler Rooms 1 and 2 from technical water supply

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
1	Подача исходной воды Feed water flow	–	–	–
1.1	I ступень / I stage	4,5	4,5	4,8
1.2	II ступень / II stage	3,6	3,6	4,0
1.3	III ступень / III stage	–	–	3,6
2	Рабочее давление Working pressure	–	–	–
2.1	I ступень / I stage	8	8	8
2.2	II ступень / II stage	12	8	8
2.3	III ступень / III stage	–	–	8
3	Удельный расход электроэнергии Specific power consumption	–	–	–
3.1	I ступень / I stage	0,5	0,5	0,5
3.2	II ступень / II stage	0,75	0,5	0,5
3.3	III ступень / III stage	–	–	0,5
4	Годовые затраты на электроэнергию Electric power costs	(… · 7000 · 5 руб. / rub)		
4.1	I ступень / I stage	4,5 · 0,5 · 7000 · 5 = 78 750,00	4,5 · 0,5 · 7000 · 5 = 78 750,00	4,8 · 0,5 · 7000 · 5 = 84 000,00
4.2	II ступень / II stage	3,6 · 0,75 · 7000 · 5 = 94 500,00	3,6 · 0,5 · 7000 · 5 = 63 000,00	4 · 0,5 · 7000 · 5 = 70 000,00
4.3	III ступень / III stage	–	–	3,6 · 0,5 · 7000 · 5 = 63 000,00

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
4.4	Годовые затраты на электроэнергию, руб./год Annual electric power costs, rub/year	173 250,00	141 750,00	217 000,00
5	Затраты на замену мембран Membrane replacement costs	–	–	–
5.1	Количество мембран / модель Number of membranes / model	–	–	–
5.1.1	I ступень / I stage	3 / nanoNF	4 / 70 NE	4 / nanoNF
5.1.2	II ступень / II stage	3 / BLN	3 / 70 NE	3 / nanoNF
5.1.3	III ступень / III stage	–	–	3 / nanoNF
5.2	Годовая стоимость замены мембран Annual membrane replacement costs	–	–	–
5.2.1	I ступень / I stage	3 · 50 000/5 = 30 000,00	4 · 50 000/5 = 40 000,00	4 · 50 000/5 = 40 000,00
5.2.2	II ступень / II stage	3 · 50 000/5 = 30 000,00	3 · 50 000/5 = 30 000,00	3 · 50 000/5 = 30 000,00
5.2.3	III ступень / III stage	–	–	3 · 50 000/5 = 30 000,00
5.3	Итого стоимость замены мембран, руб./год Annual membrane replacement costs, rub/year	60 000,00	70 000,00	100 000,00
6	Годовые затраты на ингибитор, руб. Antiscalant annual costs evaluation, rub	–	–	–
6.1	Доза ингибитора, г/м³ Antiscalant dose, ppm	–	–	–
6.1.1	I ступень / I stage	–	5	–
6.1.2	II ступень / II stage	10	–	–
6.1.3	III ступень / III stage	–	–	–
6.2	Расход ингибитора, кг/ч · 7000 Antiscalant consumption, kilos per hour · 7,000	–	–	–

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
6.2.1	I ступень / I stage	–	0,023	–
6.2.2	II ступень / II stage	0,045	–	–
6.2.3	III ступень / III stage	–	–	–
6.3	Годовое потребление ингибитора, кг Annual consumption of antiscalant, kg	315	160	–
6.4	Годовые затраты на ингибитор, руб./год · 7000 · 1200 Antiscalant annual costs, rub/year · 7000 · 1200	378 000,00	189 000,00	–
7.1	Затраты на моющие растворы · количество промывок в год Cost of cleaning solutions · number of washes per year			
7.1.1	Количество реагентов для промывки I ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the first stage, kilos	6 · 1 = 6	8 · 4 = 32	8 · 1 = 8
7.1.2	Количество реагентов для промывки II ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the second stage, kilos	6 · 6 = 36	6 · 1 = 6	6 · 1 = 6
7.1.3	Количество реагентов для промывки III ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the first stage, kilos	–	–	–
7.2	Годовые затраты на промывки · 1000 Annual cleaning costs evaluation · 1,000	42 000,00	38 000,00	14 000,00
8	Затраты на водоотведение Water disposal costs	–	–	–
8.1	Тариф на сброс 40 руб./м³ Discharge rate 40 rub/m³	–	–	–
8.2	Годовой сброс, м³ Annual discharge, cubic meters	2 100	2 100	2 100
8.3	Годовые расходы на сброс, руб./год Annual cleaning costs, rub/year	84 000,00	84 000,00	84 000,00
9	Итого годовые затраты по всем пунктам, руб./год Total annual costs, rub per year	737 250,00	522 750,00	415 000,00
10	Стоимость установок, руб. Membrane facility capital costs, rub	2 200 000,00	2 400 000,00	2 600 000,00

3) трехступенчатая схема: на первой и второй ступенях используются мембраны типа nanoNF. Третья ступень оборудована нанофильтрационными мембранами типа 70 NE, что обеспечивает получение высококачественной умягченной воды.

В табл. 2 представлены данные о необходимом количестве мембранных элементов стандарта 8040 для каждой ступени очистки в мембранной установке, рассчитанной на производительность 3 м³/ч.

Для сравнения экономических показателей каждой схемы определены [3]:

- значение годовых энергозатрат;
- годовые затраты на замену мембран из расчета их замены один раз в 5 лет;
- годовые затраты на ингибиторы;
- годовые затраты на моющие растворы.

В табл. 2 приведено сравнение величин годовых эксплуатационных затрат установки производительностью 3 м³/ч для очистки подземной воды с целью получения воды, используемой для питания водогрейных котлов (рис. 8).

Затраты на электроэнергию рассчитываются исходя из требуемого расхода и напора насосных агрегатов. При рабочем давлении 16 бар расход электроэнергии составляет 1 кВт/м³, при давлении 7 бар — соответственно 0,5 кВт/м³, и при давлении 12 бар — 0,75 кВт/м³. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии принят авторами 5 руб.

Стоимость одного элемента стандарта 8040 (40 м² мембран) составляет в среднем 50 000 руб. Доза ингибитора, дозируемого в исходную воду для предотвращения образования осадка карбоната кальция, составляет 10 г/м³ воды, поступающей в установку. При использовании мембран 70 NE на начальной стадии очистки требуется дозирование ингибитора в количестве 3–5 г/м³ исходной

воды. Расход исходной воды, а также пермеатов и концентратов, полученных на первой и второй стадиях очистки, представлены в балансовых схемах, которые можно увидеть на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная технология предусматривает применение двух или трех ступеней очистки воды с использованием на каждой ступени низкоселективных нанофильтрационных мембран для предотвращения образования осадков карбоната кальция в мембранных аппаратах и минимизации эксплуатационных затрат.

Использование нанофильтрационных мембран на каждом этапе очистки в мембранной установке предотвращает образование отложений карбоната кальция в мембранных аппаратах и исключает необходимость применения ингибиторов и моющих растворов, что существенно снижает эксплуатационные расходы.

Разработанная двух- или трехступенчатая схема применения мембран также позволяет регулировать качество и ионный состав очищенной воды. При этом применение трехступенчатой схемы дает возможность эффективно производить одновременную подготовку питьевой воды, воды для горячего водоснабжения и химочищенной воды для подпитки водогрейных котлов.

Анализ экономической эффективности предложенной технологии демонстрирует, что, несмотря на рост числа мембранных компонентов в системе, общие затраты на эксплуатацию мембранной установки значительно уменьшаются. Это достигается благодаря сокращению расходов на химические реагенты и утилизацию концентрата в канализацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ventresque C., Gisclon V., Bablon G., Chagneau G.* An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration Treatment plant (340,000 m³/d) // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issues 1–3. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90001-8
2. *Wang X., Hu R., Wei J., Huang T., Li K., Cheng H.* Experimental study on softening high-calcium sulfate reverse osmosis concentrate using induced crystallization method // *Water*. 2024. Vol. 17. Issue 1. P. 4. DOI: 10.3390/W17010004
3. *Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A.* Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issue 1–3. Pp. 37–46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
4. *Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G.* Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Issue 1. Pp. 77–83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030

5. *Бабаев А.В., Подковыров В.П., Доможаков Д.И., Арутюнова И.Ю., Ягунков С.Ю.* Повторное использование сливной воды, образующейся при обработке водопроводного осадка // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10–1. С. 20–26. EDN MVRESH.
6. *Wilf M., Aerts P., Bartels C., Bloxom D., Christopher J., Festger A. et al.* The Guidebook to Membrane Technology for Wastewater Reclamation. Balaban Publishers, 2010. 788 p.
7. *Abdel-Fatah M.A.* Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment : review article // *Ain Shams Engineering Journal*. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 3077–3092. DOI: 10.1016/j.asej.2018.08.001
8. *Turek M., Mitko K., Skóra P., Dydo P., Jakóbi-Kolon A., Warzecha A. et al.* Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Issue 12. P. 1191. DOI: 10.3390/membranes12121191

9. *Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G.* Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Issue 1. Pp. 77–83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030

10. *Ribeiro R.M., Bergamasco R., Gimenes M.L.* Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent // *Desalination*. 2002. Vol. 145. Issue 1–3. Pp. 61–63. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00368-5

11. *Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A.* Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 4. P. e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908

12. *Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C. et al.* Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process // *Desalination*. 2018. Vol. 440. Pp. 156–160. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.034

13. *Джубари М.К., Алексеева Н.В.* Технологии обратного осмоса при очистке промышленных сточных вод: состояние проблемы и борьба с обрастанием мембран // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2021. № 2 (36). С. 60–70. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.020. EDN IOUHND.

14. *Иркешев Н.С., Власова А.Ю.* Исследование твердых отложений на обратноосмотических мембранах водоподготовительных установок // *Инновационная наука*. 2024. № 7–1. С. 29–35. EDN AWCQJM.

15. *Халиков Р.М., Иванова О.В.* Эффективные мембранные технологии для подготовки качественной питьевой воды // *European Research : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 89–92. EDN YRWITD.

16. *Громов С.Л., Пантелеев А.А.* Современные технологии водоподготовки как средство снижения эксплуатационных расходов // *Энергетик*. 2012. № 10. С. 15–18. EDN PEZHIF.

17. *Спицов Д.В., Андрианов А.П.* Совершенствование конструкции мембранных аппаратов с целью сокращения эксплуатационных затрат при эксплуатации мембранных установок // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 4. № 2. С. 41–44. EDN YGXEMZ.

18. *Первов А.Г., Рудакова Г.Я., Ефремов Р.В.* Разработка программ для технологического расчета систем обратного осмоса и нанофильтрации с использованием реагентов «Аминат» // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2009. № 7. С. 21–28. EDN KVOGRV.

19. *Головесов В.А., Рудакова Г.Я., Первов А.Г., Спицов Д.В.* Выбор мембран и сервисных реагентов для мембранных установок, применяемых для обработки подземных вод // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1556–1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569

20. *Горбунова Т.П., Андрианов А.П.* Разработка малоотходных технологий очистки природных вод на основе нанофильтрации и обратного осмоса // *Водоочистка*. 2013. № 1. С. 30–36. EDN PUMIAT.

Поступила в редакцию 15 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 10 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 22 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Германович Первов** — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2671-6352, РИНЦ ID: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, доцент, директор института Инженерно-экологического строительства и механизации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5240-5133, РИНЦ ID: 531559, Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAC-2402-2022, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru;

Тет Зо Аунг — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7295-4279; newmoon68109@gmail.com;

Анна Сергеевна Кулагина — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2500-4062; anya.k.11@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ventresque C., Gisclon V., Bablon G., Chagneau G. An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration Treatment plant (340,000 m³/d). *Desalination*. 2000; 131(1-3):1-16. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90001-8
2. Wang X., Hu R., Wei J., Huang T., Li K., Cheng H. Experimental study on softening high-calcium sulfate reverse osmosis concentrate using induced crystallization method. *Water*. 2024; 17(1):4. DOI: 10.3390/W17010004
3. Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater. *Desalination*. 2000; 131(1-3):37-46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
4. Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005; 172(1):77-83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030
5. Babaev A.V., Podkovyrov V.P., Domozhakov D.I., Arutyunova I.Yu., Yagunkov S.Yu. Reuse of waste water generated during the treatment of tap sludge. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2010; 10-1:20-26. EDN MVRESH. (rus.).
6. Wilf M., Aerts P., Bartels C., Bloxom D., Christopher J., Festger A. et al. *The Guidebook to Membrane Technology for Wastewater Reclamation*. Balaban Publishers, 2010; 788.
7. Abdel-Fatah M.A. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(4):3077-3092. DOI: 10.1016/j.asej.2018.08.001
8. Turek M., Mitko K., Skóra P., Dydo P., Jakóbik-Kolon A., Warzecha A. et al. Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment. *Membranes*. 2022; 12(12):1191. DOI: 10.3390/membranes12121191
9. Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005; 172(1):77-83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030
10. Ribeiro R.M., Bergamasco R., Gimenes M.L. Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent. *Desalination*. 2002; 145(1-3):61-63. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00368-5
11. Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*. 2023; 9(4):e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908
12. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C. et al. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process. *Desalination*. 2018; 440:156-160. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.034
13. Gubari M.Q., Alekseeva N.V. Reverse osmosis technologies for industrial wastewater treatment: state of the problem and control of membrane fouling. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2021; 2(36):60-70. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.020. EDN IOUHND. (rus.).
14. Irkeshev N.S., Vlasova A.Yu. Study of solid deposits on reverse osmosis membranes of water treatment plants. *Innovation Science*. 2024; 7-1:29-35. EDN AWCQJM. (rus.).
15. Khalikov R.M., Ivanova O.V. Effective membrane technologies for production of quality drinking-water. *European Research : collection of articles from the XIV International Scientific and Practical Conference*. 2018; 89-92. EDN YRWITD. (rus.).
16. Gromov S.L., Panteleev A.A. Modern water treatment technologies as a means of reducing operating costs. *Energetik*. 2012; 10:15-18. EDN PEZHIF. (rus.).
17. Spitsov D.V., Andrianov A.P. Improving the design of membrane devices in order to reduce operating costs during operation of membrane installations. *Advances in Modern Science*. 2017; 4(2):41-44. EDN YGXEMZ. (rus.).
18. Pervov A.G., Rudakova G.Ya., Efremov R.V. Development of programs for technological calculation of reverse osmosis and nanofiltration systems using “Aminat” reagents. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2009; 7:21-28. EDN KVOGRV. (rus.).
19. Golovesov V.A., Rudakova G.Ya., Pervov A.G., Spitsov D.V. The choice of membranes and reagents designated for membrane systems used to treat ground water. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(11):1556-1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569 (rus.).
20. Gorbunova T.P., Andrianov A.P. Development of low-waste technologies for natural water purification based on nanofiltration and reverse osmosis. *Water Purification*. 2013; 1:30-36. EDN PUMIAT. (rus.).

Received February 15, 2025.

Adopted in revised form on March 10, 2025.

Approved for publication on May 22, 2025.

B I O N O T E S: **Alexei G. Pervov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2671-6352, ID RSCI: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Dmitriy V. Spitsov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Engineering and Ecological Construction and Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5240-5133, ID RSCI: 531559, Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAC-2402-2022, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru;

Htet Zow Aung — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7295-4279; newmoon68109@gmail.com;

Anna S. Kulagina — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2500-4062; anya.k.11@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.