



Экологические аспекты в строительстве.

Решение экологических задач при строительстве ряда автономных объектов

**Дмитрий Владимирович Спицов^{1✉}, Алексей Вячеславович Саймуллов²,
Алексей Германович Первов³**

^{1,2,3}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

¹SpitsovDV@mgsu.ru✉

²al.saimul@yandex.ru

³ale-pervov@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является экспериментальная оценка и доказательство возможности сокращения расходов стоков систем водоподготовки, а также ливневых и бытовых стоков до объемов, позволяющих вывоз их автотранспортом, что позволило бы избежать загрязнения окружающей среды и затрат на строительство водоотводящих сетей. В работе описаны основные экологические проблемы, часто возникающие при организации систем водоснабжения и водоотведения новых строящихся объектов, удаленных от водоотводящих сетей. Рассмотрены новые мембранные технологии обратного осмоса и нанофильтрации, позволяющие обеспечить высокое качество очищенной воды как при подготовке питьевой и технической воды, так и при очистке сточных вод, делающие возможным повторное использование последних в технических целях. Основное преимущество новых технологий состоит в возможности значительного сокращения расходов воды на собственные нужды установок, что позволяет отказаться от сбросов в канализацию. В исследовании представлены технологические схемы и эксперименты, демонстрирующие возможности снижения объема концентратов. Предложены технологии для строящихся жилых комплексов, позволяющие создать автономные системы водоснабжения и вывоза отходов (стоков и осадков) автотранспортом. При этом объемы отходов не превышают 0,5 % от объемов воды, потребляемой для хозяйственно-питьевых нужд. Описанный подход к созданию систем водоснабжения и очистки сточных вод может быть использован при создании систем водного хозяйства объектов, удаленных от водопроводных и канализационных сетей, а также водоемов, в которые может быть осуществлен сброс очищенных сточных вод. Очищенная с применением обратного осмоса сточная вода может использоваться для подпитки сети оборотного водоснабжения (охлаждения оборудования) и полива зеленых насаждений.

Ключевые слова: обратный осмос, нанофильтрация, канализационные сети, подземные водозаборы, очистка сточных вод, повторное использование сточных вод, утилизация концентратов установок обратного осмоса

Для цитирования: Спицов Д. В., Саймуллов А. В., Первов А. Г. Экологические аспекты в строительстве. Решение экологических задач при строительстве ряда автономных объектов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 674–689. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-674-689>.

Original article

Environmental aspects in construction.

Environmental management in constructing autonomous facilities

Dmitry V. Spitsov^{1✉}, Aleksei V. Saimullov², Alexey G. Pervov³

^{1,2,3}Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia

¹SpitsovDV@mgsu.ru✉

²al.saimul@yandex.ru

³ale-pervov@yandex.ru

Abstract. The present work provides an experimental assessment and proves the possibility of reducing wastewater flow rates in water treatment systems, as well as storm and household sewage, to volumes allowing their inland transportation, which would help avoid environmental pollution and costs associated with building drainage networks. The paper describes major environmental problems that often arise while establishing water supply and drainage systems at new facilities under construction, remote from drainage networks. New reverse osmosis and nanofiltration membrane technologies are considered that ensure high-quality purification of both drinkable and process water and wastewater treatment, allowing the latter to be reused for technical purposes. The main advantage of new technologies comprises a significant reduction in water consumption for the balance-of-plant needs, which allows discharges to sewers to be avoided. The study provides process diagrams and experiments demonstrating the possibilities of reducing the volume of concentrates. Technologies for residential building sites are proposed, offering a possibility of designing autonomous systems of water supply and discharge (runoffs and sediments) by vehicles. Furthermore, the volume of wastewater is less than 0.5% of that of water consumed for drinking needs. The described approach to designing water supply and wastewater treatment systems can be used for developing waterworks systems at facilities remote from water supply and sewerage networks, as well as reservoirs where treated wastewater can be discharged. Wastewater purified by reverse osmosis can be used for feeding the recycling water supply network (equipment cooling) and green spaces irrigation.

Keywords: reverse osmosis, nanofiltration, sewerage, ground water intakes, wastewater treatment, wastewater reuse, reverse osmosis facilities concentrate handling

For citation: Spitsov D. V., Saimullov A. V., Pervov A. G. Environmental aspects in construction. Environmental management in constructing autonomous facilities. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(4):674-689. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-674-689>.

Введение

При подготовке строительных объектов важное значение имеют экологические вопросы: отсутствие стоков, энергосбережение, ресурсосбережение, отсутствие дополнительных работ, безопасность здоровья населения.

Серьезную проблему при строительстве и вводе новых объектов представляет обеспечение водой (подключение к водопроводным сетям), подключение к водоотводящим сетям, организация систем очистки ливневых стоков. Большое значение приобретает автономное снабжение объекта водой и очистка стоков на месте.

Основными источниками загрязнения окружающей среды объекта являются:

- бытовые сточные воды;
- ливневые сточные воды автостоянок и АЗС, содержащие нефтепродукты;
- сточные воды (воды на «собственные нужды» систем водоподготовки, подготовки питьевой воды, подготовки воды для теплосетей систем отопления и подготовки горячей воды, а также контуров систем охлаждения и кондиционирования воздуха).

Создание бессточных и оборотных систем повторного использования воды в последние годы стало возможным благодаря применению метода обратного осмоса, обеспечиваю-

щего универсальную очистку от органических веществ, нефтепродуктов, минеральных солей, ионов жесткости, железа и аммония. Поэтому при создании систем водного хозяйства автономных объектов мембраны могут быть эффективно использованы как для целей подготовки питьевой и технической воды, так и для целей очистки сточных вод, бытовых и ливневых стоков [1]. Однако, несмотря на известную эффективность, технологии обратного осмоса имеют ограниченное применение при очистке сточных вод. Это связано с наличием «побочных продуктов» – концентратов, которые необходимо утилизировать. Настоящая работа предлагает результаты новых исследований, проведенных на кафедре водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ с целью радикального сокращения расходов концентратов систем мембранной очистки воды до величин, не превышающих 0,2–1 %.

Цель настоящей работы – экспериментальная оценка и доказательство возможности сокращения стоков систем водоподготовки, а также ливневых и бытовых стоков до объемов, позволяющих вывоз их автотранспортом, что позволит избежать загрязнения окружающей среды и затрат на строительство водоотводящих сетей.

Опыт проведения экспериментальных работ и внедрения мембранных установок показывает, что возможности установок обратного осмоса ограничены: снижение объема концентрата затрудняется присутствием в нем органических веществ, увеличивающих осмотическое давление, а также ионов кальция, вызывающих осадкообразование на мембранах.

Ранее проведенные экспериментальные работы по сокращению расходов концентратов показали, что селективности по одновалентным ионам, двухвалентным ионам и органическим веществам отличаются. Это подсказывает направление исследований: разделить сточные воды на различные составляющие (раствор органических веществ, растворы солей) и концентрировать, разделять и утилизировать концентраты и стоки раздельно [2]. В настоящей работе приводятся разработанные авторами решения, подготовленные для объектов Газпрома (поселения при повысительных насосных станциях), которые требуют воды для водоснабжения (питьевого и технического, подпитки систем охлаждения насосного оборудования, а также отопления), очистки бытовых сточных вод, очистки сточных вод, продувки систем охлаждения, очистки ливневых стоков площадок хранения и мойки автотранспорта, площадок хранения горючесмазочных материалов и заправок. Аналогичные задачи выполнены при строительстве и эксплуатации поселков сотрудников нефтегазодобывающих отраслей с решением проблем водоснабжения и водоотведения, расположенных в местах, удаленных от водоисточников. Такой же подход может быть использован при вводе новых поселений и микрорайонов, удаленных от городских сетей [3–5].

Сущность подхода заключается в следующем:

- использование мембранных установок обратного осмоса для подготовки питьевой воды, с применением подземных водозаборов и с утилизацией концентрата установок;
- использование установок обратного осмоса с утилизацией концентратов для подготовки воды для горячего водоснабжения;
- применение систем обратного осмоса для очистки бытовых сточных вод, которые могут быть повторно использованы для технических целей: подпитки теплосетей и систем отопления, оборотных систем охлаждения и кондиционирования воздуха; систем полива зеленых насаждений;
- применение установок обратного осмоса для очистки ливневых вод;
- использование новых разработанных систем для сокращения расходов сточных

вод (концентратов) с целью упрощения их утилизации: выделение осадков малорастворимых солей, концентратов органических веществ, солей аммония.

Описываемые мероприятия направлены на снижение расходов сточных вод и загрязнения окружающей среды, создание безотходных систем, сокращение стоков до минимальных объемов, делающих рациональным их вывоз на сооружения очистки сточных вод [6, 7].

Для достижения цели настоящей работы были проведены демонстрационные эксперименты, позволяющие радикально сократить расходы стоков (концентратов установок обратного осмоса) систем, используемых для водоподготовки и очистки сточных вод, за счет выделения из концентратов осадков малорастворимых солей и разделения их на высококонцентрированные растворы органических веществ и минеральных солей [8].

Методы

В работе представлены результаты экспериментов, позволяющих уменьшить расходы концентратов установок, используемых для водоподготовки и очистки сточных вод:

- сокращение расхода концентрата установок очистки подземной воды за счет удаления из него малорастворимых солей (карбоната кальция, гидроокиси магния и сульфата кальция) с получением шлама и концентрата с содержанием 100 г/л и выше, составляющих менее 1 процента расхода воды для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения в жилых зданиях;
- очистка бытовых сточных вод с применением установки обратного осмоса: эксперименты по повышению эффективности очистки от аммония и других биогенных элементов и загрязнений;
- определение количества ступеней очистки для получения заданного качества воды, пригодной для ее сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения и для повторного использования в технических целях;
- экспериментальное определение максимально возможного сокращения расхода концентрата;
- разделение концентрата на раствор органических соединений и солевой концентрат;
- экспериментальное разделение стоков установок районных тепловых станций для подпитки воды для теплосетей больших расходов с целью утилизации стоков.

Было проведено три экспериментальных программы, ставящих целью не только получить очищенную воду для питьевого или технического водоснабжения, но и максимально

утилизировать отходы – концентраты мембранных установок.

Были экспериментально исследованы:

– очистка подземных вод методами обратного осмоса и нанофильтрации и сокращение расхода концентрата мембранных установок путем удаления/осаждения из концентрата карбоната кальция с доведением концентрации солей до 190–150 граммов на литр;

– очистка бытовых сточных вод методом обратного осмоса с радикальным сокращением концентрата до величины, не превышающей 0,3–0,5 % от расхода сточной воды. Использовалась специально разработанная методика, позволяющая разделить концентрат

на два концентрированных раствора: органических веществ и минеральных солей (в основном, солей аммония), которые могут быть утилизированы отдельно: раствор органических веществ утилизируется совместно с обезвоженным осадком взвешенных веществ, а раствор солей аммония может использоваться при производстве удобрений.

Экспериментальная методика по оценке возможности сокращения расхода концентрата установок обратного осмоса путем выделения из него карбоната кальция и схема экспериментальной установки показаны на рис. 1.

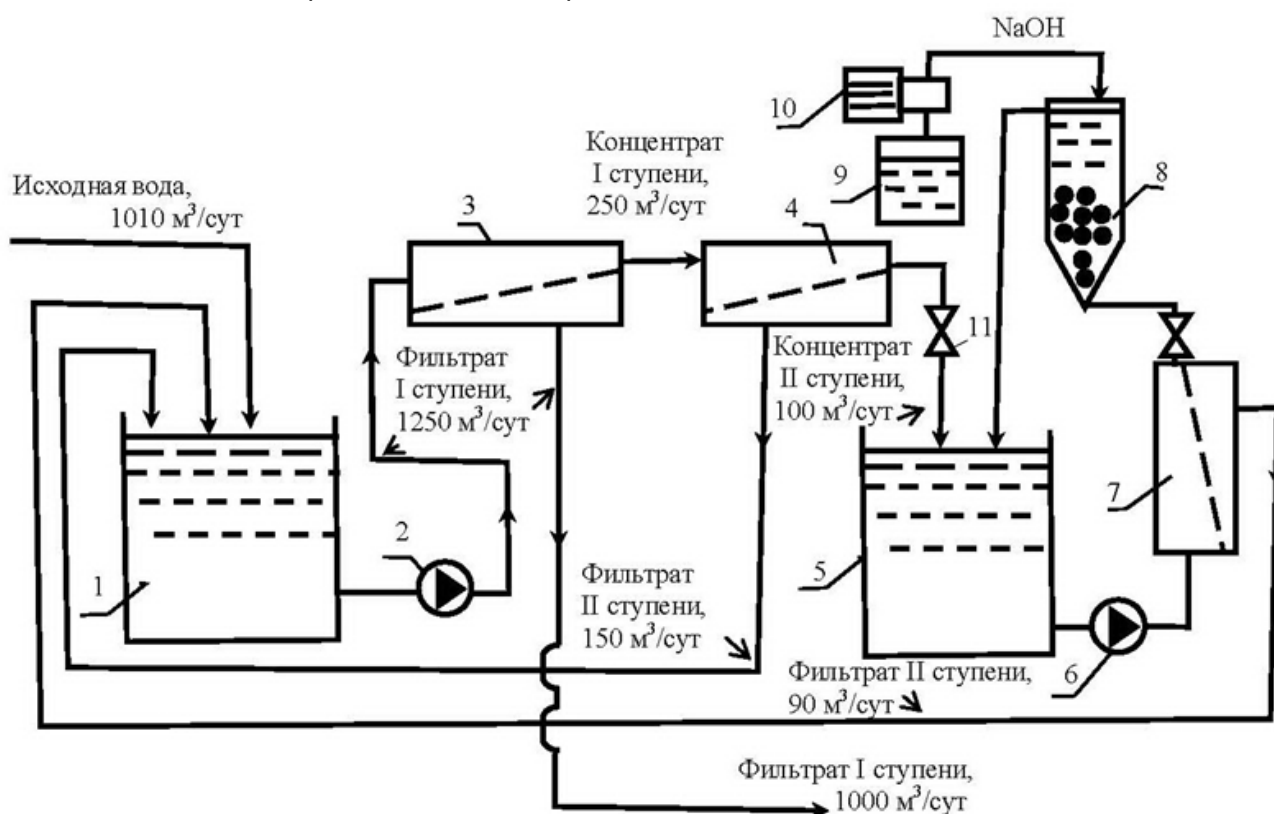


Рис. 1. Схема пилотной установки для снижения расхода концентрата установки обратного осмоса:

- 1 – резервуар исходной воды (после предочистки, обезжелезивания и добавления ингибиторов);
- 2 – рабочий насос высокого давления; 3 – аппарат обратного осмоса первой ступени;
- 4 – аппарат нанофильтрации второй ступени; 5 – сборный бак концентрата второй ступени;
- 6 – рабочий насос второй ступени; 7 – нанофильтрационный аппарат-«концентратор» третьей ступени;
- 8 – реактор-отстойник с «затравочными» кристаллами; 9 – бак с едким натром;
- 10 – насос-дозатор едкого натра; 11 – регулирующий вентиль

Fig. 1. Scheme of a pilot plant to reduce the consumption of the reverse osmosis plant concentrate:

- 1 – reservoir of source water (after pretreatment, deferrization and addition of inhibitors);
- 2 – working high pressure pump; 3 – first stage reverse osmosis apparatus; 4 – second stage nanofiltration apparatus;
- 5 – collecting tank of the second stage concentrate; 6 – working pump of the second stage;
- 7 – nanofiltration apparatus -"concentrator" of the third stage; 8 – reactor-settler with "seed" crystals;
- 9 – caustic soda tank; 10 – caustic soda dosing pump; 11 – control valve

Экспериментальные исследования проводились с применением водопроводной воды. Использовались мембранные элементы моделей RE-1812-100 с обратноосмотическими мембранами типа BLN и нанофильтрационными мембранами типа 70 NE производства корейской компании CSM. Затравочные кристаллы приготавливались путем добавления едкого натра в концентрат установки обратного осмоса. Для этого 300 мл однонормально (1N) раствора наливали в 10 литров концентрата (сконцентрированной в 5 раз водопроводной воды).

Определение ионов кальция и магния проводилось с помощью трилометрического титрования. Определение величины общего солесодержания в концентрате и пермеате проводилось с помощью портативного TDS-метра. Исходная вода подавалась в бак 1 емкостью 100 л, откуда насосом 2 подавалась в мембранный элемент 3 с мембранами обратного осмоса. Объем концентрата доводился до 20 литров, что соответствовало значению коэффициента снижения объема исходной воды K (отношению объемов исходной воды в баке 1 и полученного в конце эксперимента концентрата), равному 5. После окончания цикла концентрирования исходной воды в бак 1 подавался раствор едкого натра в количестве, эквивалентном величине общей жесткости. После выпадения осадка взвесь отстаивалась и помещалась в бак-реактор 8. В процессе работы установки определялись значения коэффициента снижения объема K . После этого эксперимент повторялся: с помощью кранов-переключателей 11 аппарат 3 заменялся на аппарат 4, с применением нанофильтрационных мембран 70NE объем концентрата снижался в 2 раза, получался объем 10 л. Концентрат из бака 5 насосом 6 подавался в аппарат третьей ступени 7. Из аппарата 7 концентрат направлялся в реактор 8 и после прохода через реактор возвращался в бак 5.

При прохождении концентрата через реактор карбонат кальция осаждался на затравочных кристаллах, и концентрация ионов кальция в концентрате снижалась на эквивалентное количество удаленного из воды карбоната кальция. В начале эксперимента объем исходной воды снижался в 4 раза (что соответствовало значению коэффициента K , равному 4). При этом использовались мембраны обратного осмоса типа BLN. Далее снижение объема исходной воды в баке 1 производилось до достижения значения $K = 10$ с применением нанофильтрационных мембран.

Результаты экспериментов по накоплению осадка на «затравке» представлены на рис. 2.

На рис. 2 а показано изменение концентрации кальция в зависимости от значения коэффициента снижения объема K .

Для сравнения на данном графике показано также изменение концентрации кальция при проведении эксперимента с применением мембран 70 NE без контакта концентрата с кристаллами «затравки».

На рис. 2 б показано изменение величины общего солесодержания концентрата, рассчитанное с учетом количества осажденного карбоната кальция от значения коэффициента K . Результаты определения осажденных на кристаллах «затравки» количеств карбоната кальция и гидроокиси магния от значения коэффициента K показаны на рис. 2 с.

Как известно, метод обратного осмоса эффективно используется для доочистки сточных вод. Проблему утилизации концентрата предложено решать с помощью сокращения его расхода [3]. Однако достичь высоких значений коэффициента K (малых объемов концентрата, позволяющих его утилизировать) оказывается сложно: наличие органических веществ затрудняет концентрирование и снижает производительность мембран за счет прироста осмотического давления раствора.

Представляет интерес отделение органических веществ от неорганических солей, в основном солей аммония, в сточных водах, а также одновалентных ионов от двухвалентных [9]. Такие попытки предпринимались рядом авторов с использованием процесса нанофильтрации, с применением электродиализа, отделения органических веществ за счет экстракции и реагентного осаждения. Сокращение расходов концентратов ведется на основе процессов ZLD (*Zero Liquid Discharge*) за счет применения процессов реагентного умягчения и выпаривания [10–12].

В настоящей работе разработан и экспериментально опробован новый технологический «прием», позволяющий провести отделение органики от растворенных ионов и разделить ионы в зависимости от их валентностей, а также получить высококонцентрированные растворы, используя только мембраны обратного осмоса.

При проведении экспериментов по очистке сточных вод давно было замечено, что селективности нанофильтрационных мембран по различным загрязнениям сильно отличаются. В экспериментах использовался концентрат установки обратного осмоса, полученный при обработке сточной воды после первичных отстаивающих станции очистки сточных вод г. Нарофоминска, МО.

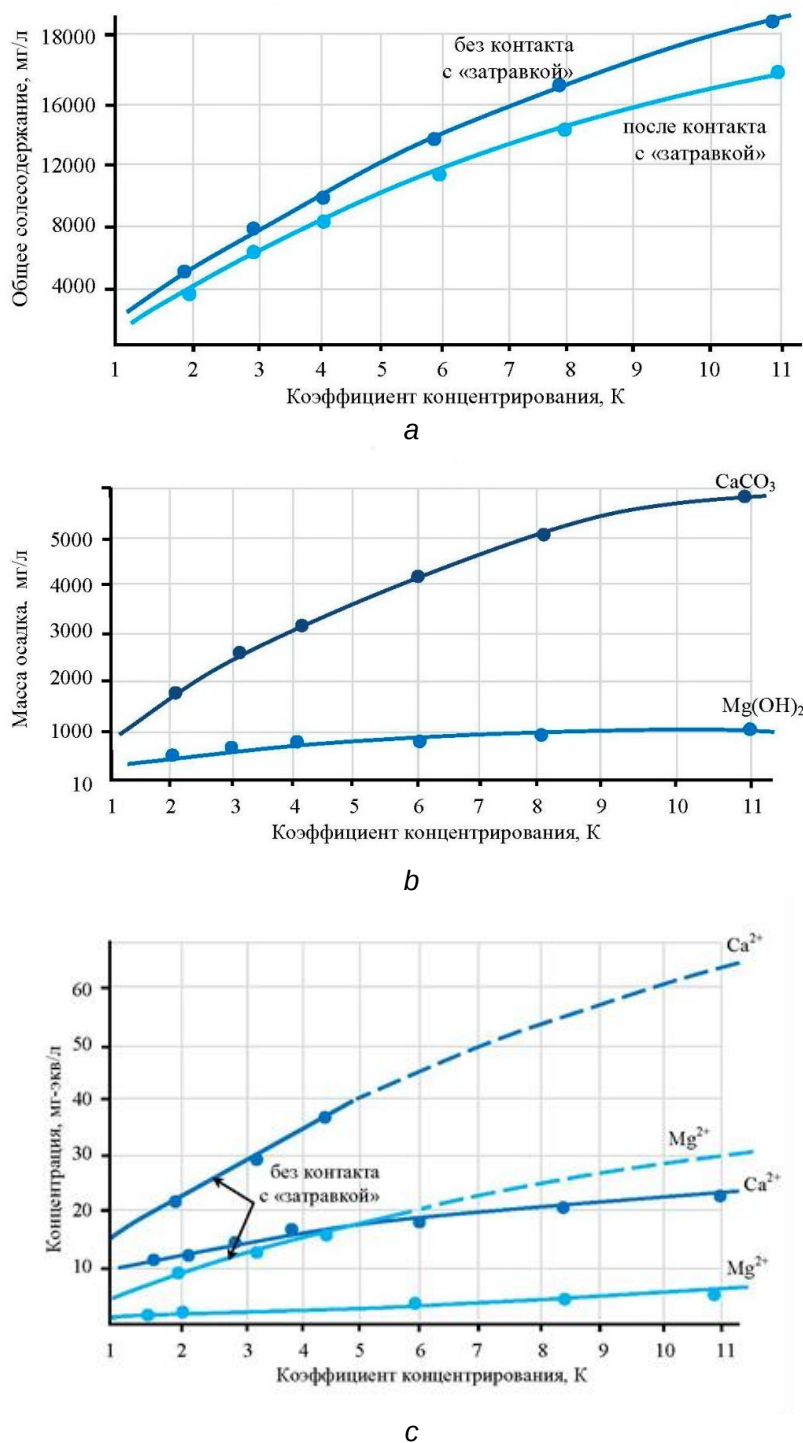


Рис. 2. Результаты экспериментов по накоплению карбоната кальция и гидроокиси магния на третьей ступени очистки: а – зависимости концентраций ионов кальция и магния в концентрате установки третьей ступени от величины K ; б – зависимости величины общего солесодержания от значения коэффициента снижения объема K на третьей ступени; в – зависимости количеств образовавшихся осадков карбоната кальция и гидроокиси магния на «затравке» в реакторе от величины K

Fig. 2. The results of experiments on the accumulation of calcium carbonate and magnesium hydroxide at the third stage of purification: а – the dependence of the concentrations of calcium and magnesium ions in the concentrate of the third stage installation, depending on the value of K ; б – the dependence of the value of the total salt content on the value of the volume reduction factor K at the third stage; в – the dependence of the amounts of the formed precipitation of calcium carbonate and magnesium hydroxide on the "seed" in the reactor on the value of K

Сточная вода была обработана с применением обратноосмотических мембран и сконцентрирована в 10 раз ($K = 10$). Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Исходная вода (концентрат) помещалась в бак 2, откуда насосом 3 подавалась в аппарат

с нанофильтрационными мембранами, при этом до 90 % органических веществ, определяющих значение химического потребления кислорода (ХПК), задерживались мембраной.

Концентрат после обработки возвращался обратно в бак 2, а пермеат (не содержащий органических веществ) собирался в баке 6.

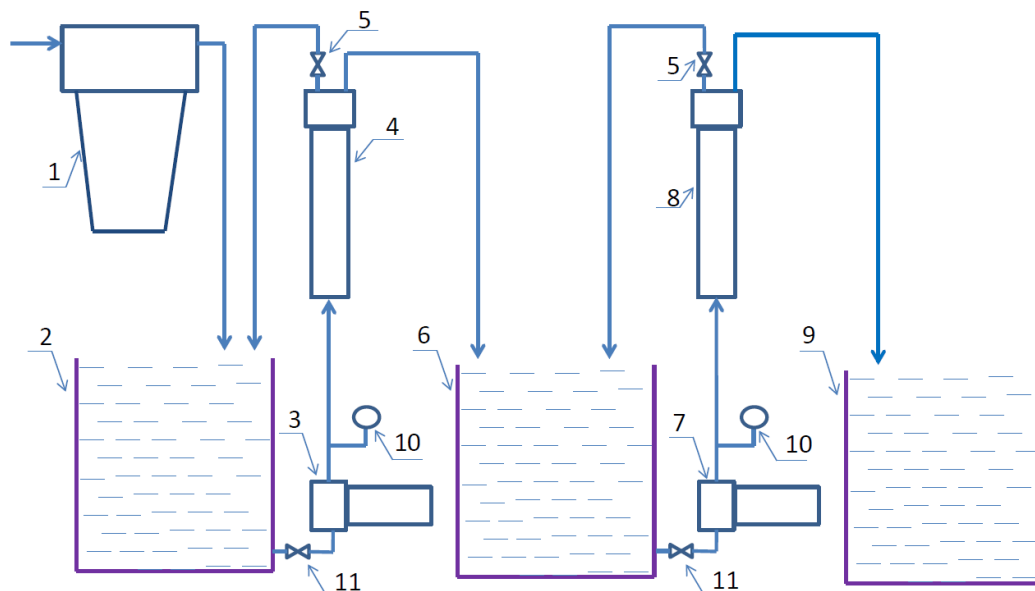


Рис. 3. Схема проведения эксперимента.

1 – патронный фильтр, 2 – бак исходного концентрата, 3 – рабочий насос первой ступени, 4 – нанофильтрационный аппарат первой ступени, 5 – регулирующий давление вентиль, 6 – бак сбора пермеата первой ступени, 7 – рабочий насос второй ступени, 8 – обратноосмотический элемент второй ступени, 9 – бак сбора пермеата второй ступени, 10 – манометры

Fig. 3. Scheme of the experiment.

1 – cartridge filter, 2 – tank of initial concentrate, 3 – working pump of the first stage, 4 – first stage nanofiltration apparatus, 5 – pressure control valve, 6 – first stage permeate collection tank, 7 – second stage working pump, 8 – second stage reverse osmosis element, 9 – second stage permeate collection tank, 10 – pressure gauges

После завершения цикла пермеат обрабатывался с применением обратноосмотических мембран для получения высококонцентрированного раствора, который оставался в баке 6, а пермеат после аппарата обратного осмоса направлялся в бак 9. После завершения цикла в бак 2 добавлялась деминерализованная вода (с величиной удельной электропроводности 15–25 мксм/см) и цикл повторялся [13, 14].

Определение значений ХПК производилось титриметрическим методом. На рис. 4 и 5 представлены результаты определений значений ХПК, а также концентраций ионов кальция и аммония при обработке концентрата установки обратного осмоса после очистки сточных вод. Представлены зависимости значений ХПК, концентраций аммония и кальция от значений коэффициента снижения объема

K на каждом этапе обработки после разбавления и последующего концентрирования.

Результаты и их обсуждение

Как показано на рис. 2, по мере роста значения коэффициента K наблюдается рост кристаллов карбоната кальция и гидроокиси магния. Это связано с тем, что при добавлении едкого натра в концентрат высаживаются как карбонат кальция, так и гидроокись магния [15, 16]. Общая «картина» роста концентраций кальция и магния в аппаратах обратного осмоса первой ступени и в концентратах нанофильтрационных аппаратов в процессе их работы в зависимости от достигаемого значения K представлена на рис. 6. Снижение производительности нанофильтрационных аппаратов с ростом величины общего солеудержания концентрата показано на рис. 7.

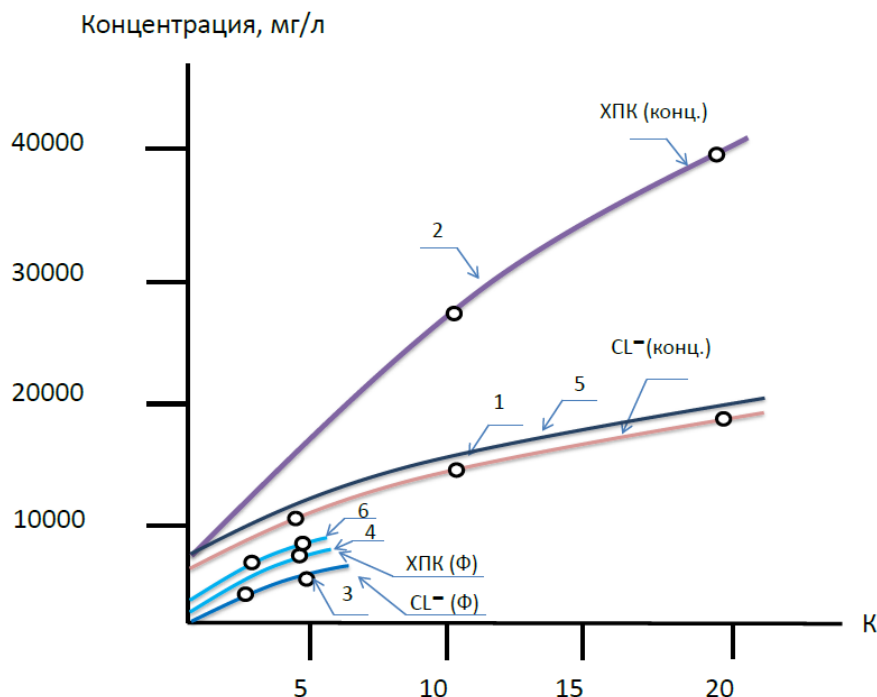


Рис. 4. Зависимость значений концентраций ХПК, хлоридов, аммония от значения коэффициента снижения объема K (отношения исходного объема концентрата к объему концентрата в конце эксперимента): 1, 2, 5 – концентрирование исходного концентрата; 3, 4, 6 – значение ХПК, аммония и хлоридов в пермеате

Fig. 4. Dependence of the values of the concentrations of COD, chlorides, ammonium on the value of the volume reduction factor K (the ratio of the initial volume of the concentrate to the volume of the concentrate at the end of the experiment): 1, 2, 5 – concentration of the original concentrate; 3, 4, 6 – the value of COD, ammonium and chlorides in the permeate

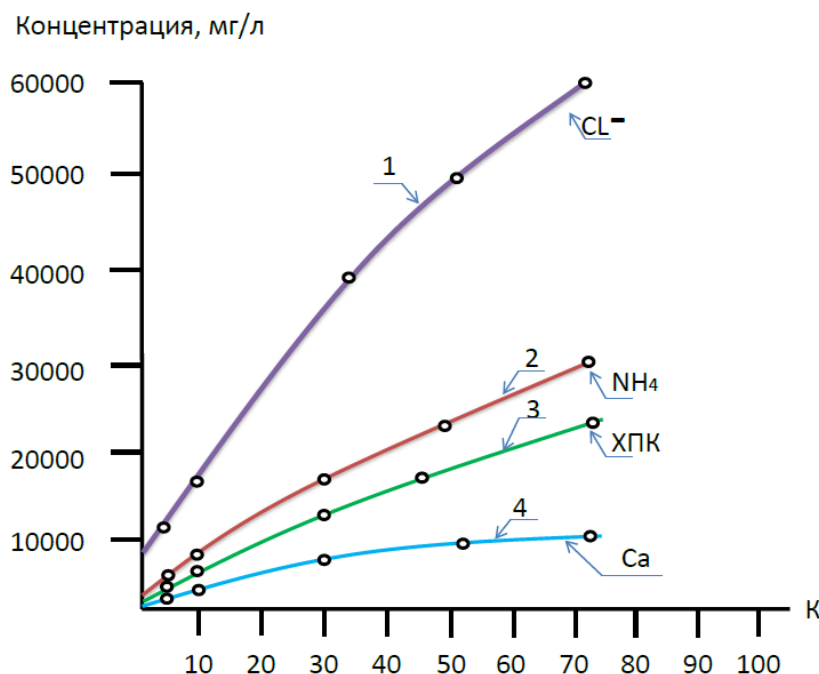


Рис. 5. Концентрации в пермеате после разбавления концентрата. Концентрирование пермеата с целью получения концентрированного раствора хлорида аммония

Fig. 5. Concentration in permeate after concentrate dilution. Concentration of the permeate in order to obtain a concentrated solution of ammonium chloride

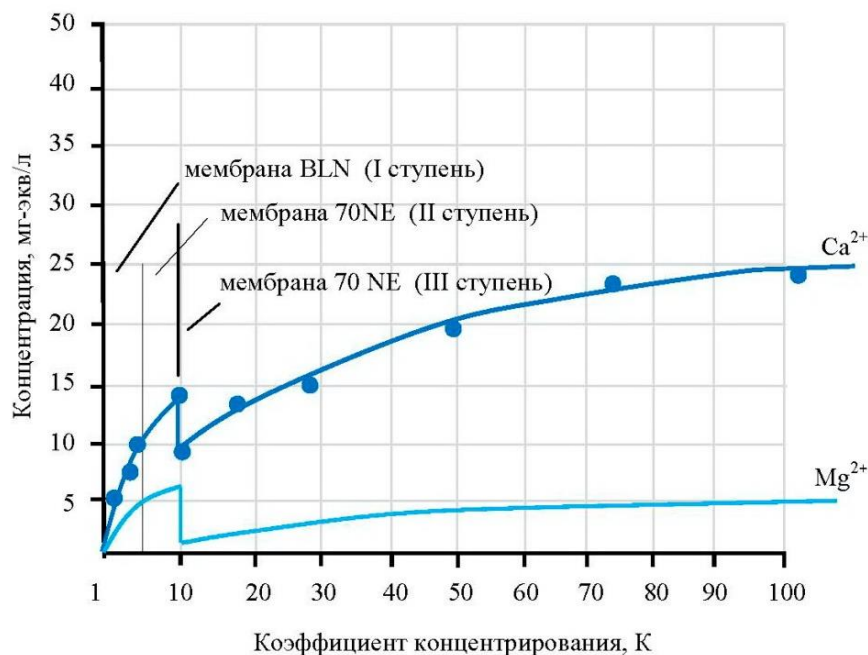


Рис. 6. Изменение концентраций ионов кальция и магния в концентрате установки на каждой ступени в зависимости от значения коэффициента снижения объема K
Fig. 6. The change in the concentration of calcium and magnesium ions in the concentrate of the installation at each stage from the value of the volume reduction factor K

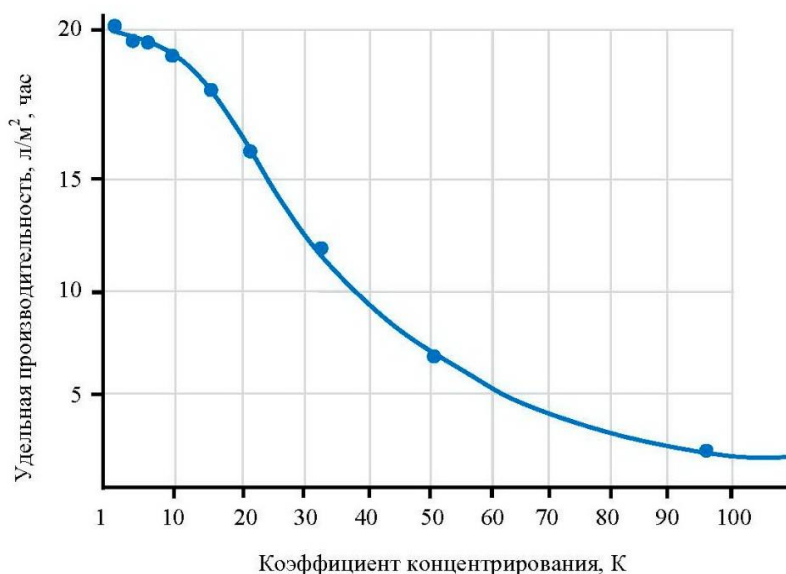


Рис. 7. Снижение удельной производительности мембран 70 NE в процессе обработки концентрата на третьей ступени в зависимости от значения коэффициента снижения объема K
Fig. 7. Decrease in the specific productivity of 70 NE membranes during processing of the concentrate at the third stage, depending on the value of the volume reduction factor K

Как видно из рис. 8 и 9, по мере разбавления концентрата увеличивается эффективность обработки и концентрирования и возможность снижения объема концентрата с ростом значения коэффициента K . На рис. 10 показаны зависимости снижения удельной производительности мембран при обработке концентрата и при обработке концентрата по-

сле разбавления. После разбавления процесс концентрирования раствора органических веществ идет намного эффективнее, что позволяет увеличить значение ХПК концентрата с 5000 до 40 000 мг/л, снизив его расход в 20 раз. Пермеат после проведения процессов разбавления и последующего концентрирования может быть также обработан с получени-

ем высоконцентрированных растворов солей натрия и аммония с величиной солесодержания до 80 000 мг/л и деминерализованной воды, используемой для разбавления. Для практического применения разработанных технологий важно определить параметры всех эле-

ментов технологической схемы: объемы баков, расходы реагентов, количество мембранных аппаратов на каждой ступени. Принципы разработанной технологии сокращения расхода и утилизации концентрата установок водоподготовки показаны на рис. 10.

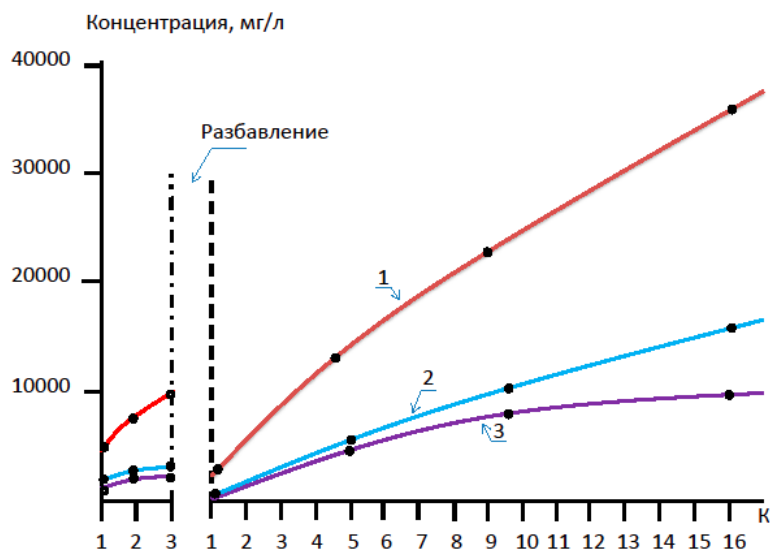


Рис. 8. Зависимость значений концентраций ХПК, хлоридов и аммония от значения коэффициента снижения объема K (отношения исходного объема концентрата к объему концентрата в конце эксперимента): 1 – ХПК, 2 – аммоний, 3 – хлориды

Fig. 8. Dependence of the values of the concentrations of COD, ammonium and chlorides on the value of the volume reduction factor K (the ratio of the initial volume of the concentrate to the volume of the concentrate at the end of the experiment): 1 – COD, 2 – ammonium, 3 – chlorides

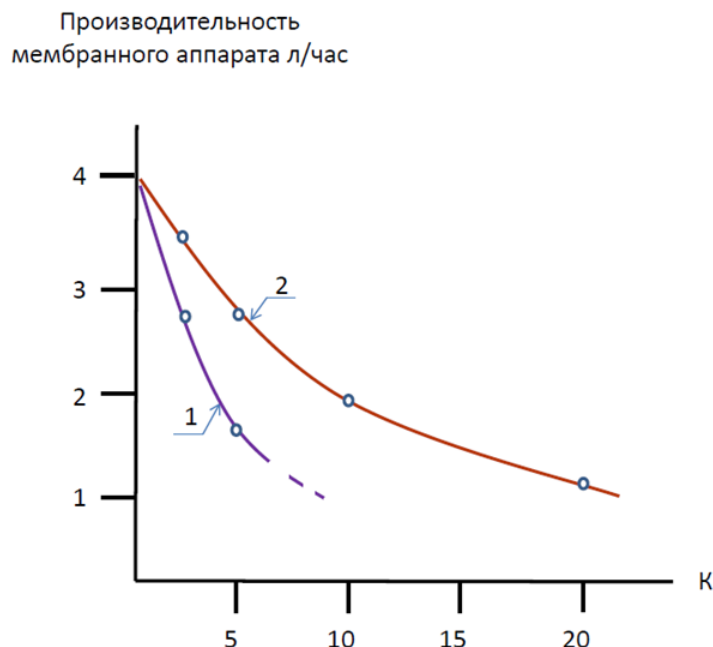


Рис. 9. Снижение производительности мембран в процессе концентрирования: 1 – концентрирование исходного концентрата; 2 – после разбавления

Fig. 9. Decrease in membrane performance during concentration: 1 – concentration of the original concentrate; 2 – after dilution

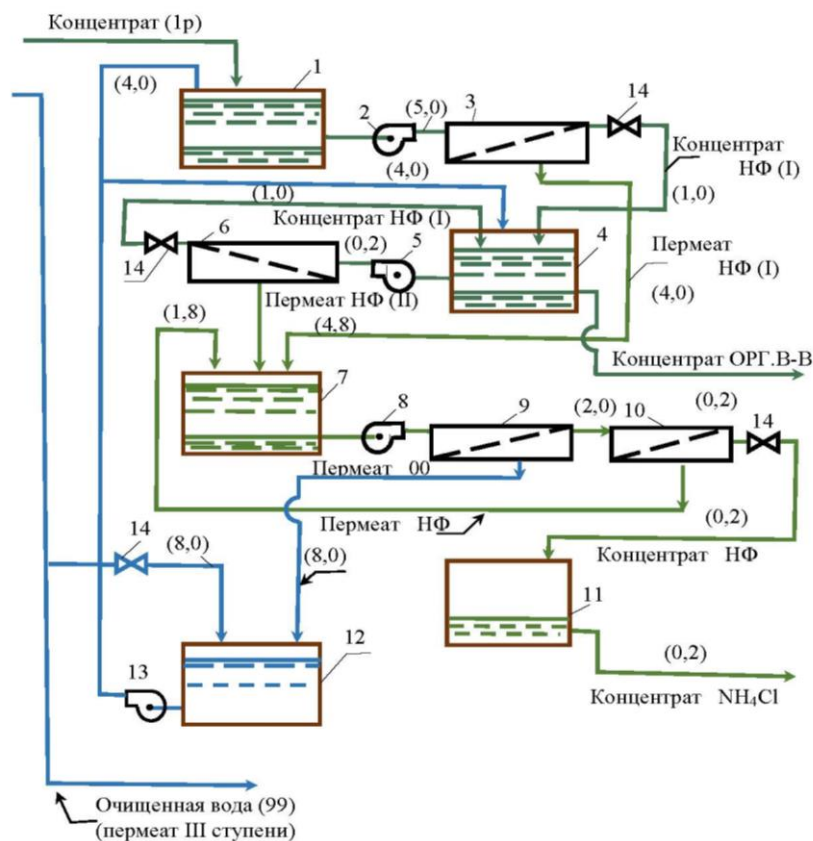


Рис. 10. Схема разделения минерализованных стоков с применением методов нанофильтрации и обратного осмоса с указанием расходов:

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

Fig. 10. Scheme for the separation of saline waste using nanofiltration and reverse osmosis methods, indicating the costs:

1 – receiving tank for runoff and water for dilution of the first cycle; 2 – working pump of the first stage; 3 – first stage membrane apparatus with nanofiltration membranes; 4 – tank for collecting concentrate of the first stage and dilution of the second cycle; 5 – pump for feeding the nanofiltration apparatus of the second concentration cycle; 6 – nanofiltration apparatus of the second concentration cycle; 7 – tank for collecting permeate of nanofiltration devices 3 and 6; 8 – working pump of the installation for reducing the volume of permeate; 9 – reverse osmosis apparatus for reducing the consumption of permeate; 10 – nanofiltration apparatus for reducing the consumption of permeate; 11 – tank for collecting permeate after concentration; 12 – tank for collecting permeate from devices with reverse osmosis membranes; 13 – pump for supplying permeate for dilution; 14 – valve

Сокращение объема концентрата в баке 4 происходит непрерывно: в бак 4 поступает концентрат после обработки воды, далее концентрат постоянно проходит аппарат 6. Пермеат аппарата 6 постоянно отводится и направляется на вход в установку в бак 1. Таким образом, процесс обработки концентрата заканчивается, когда производительность аппарата 6 становится меньше расхода концен-

трата, поступающего в бак 4, когда концентрация солей в концентрате, находящемся в баке 4, достигает своего максимального значения. Расход едкого натра для создания «затравки» составляет не более 2–2,5 процентов от расхода на реагенты в случае проведения реагентного умягчения, когда щелочь или известь добавляются в воду в стехиометрических количествах. Расчет объемов баков

определяется на основе решения уравнений массового баланса: притока концентрата и отвода пермеата от аппаратов-концентраторов в течение суток. Расход транзитного потока через реактор подбирается в зависимости от времени нахождения в баке-реакторе и скорости восходящего потока во избежание выноса кристаллов из баке-реактора. Объем баке-реактора может подбираться, исходя из заданного объема концентрата, удаляемого из установки 1 раз в сутки, а также исходя из максимально достижимого значения концентрации солей в концентрате. Например, при производительности установки 1000 куб. м в сутки расход концентрата при $K = 200$ составляет 5 куб. м в сутки, что делает возможным вывоз концентрата с объекта автотранспортом.

Описанный способ сокращения расхода концентрата и выделения из него осадков малорастворимых солей может быть использован и при обработке концентратов установок

обратного осмоса, используемых для очистки сточных вод [17]. Однако такая обработка целесообразна после разделения концентрата на раствор органических веществ и солевой раствор в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. Как показывают результаты экспериментов по сокращению расходов концентратов после очистки сточных вод, применение дополнительных циклов разбавления и концентрирования незначительно увеличивает затраты на обработку, поскольку после разбавления производительность мембран возрастает. Применение нанофильтрационных мембран значительно упрощает процесс и снижает эксплуатационные затраты. На рис. 11 показана упрощенная схема установки по сокращению расходов концентратов и минерализованных стоков с указанием их расходов, позволяющая разделить стоки на очищенную воду и концентрат органических соединений.

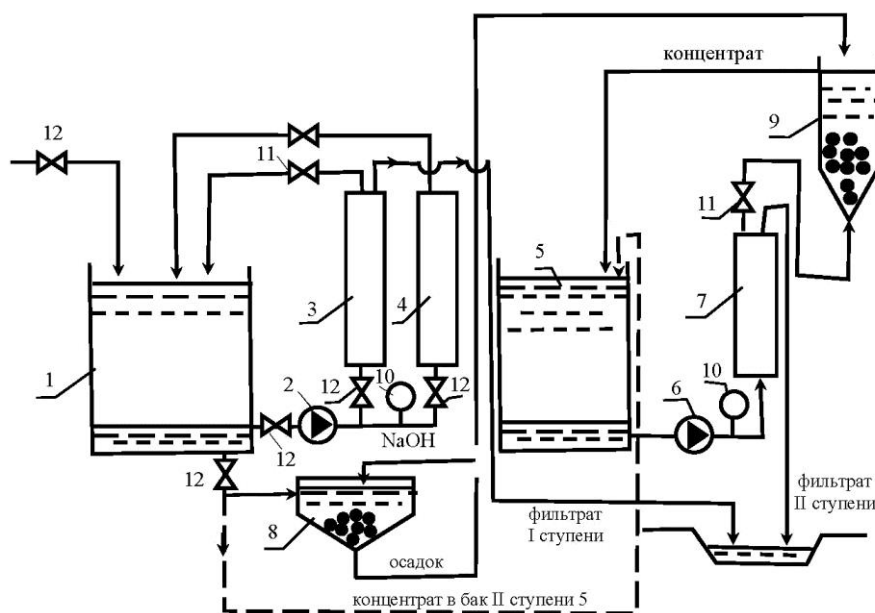


Рис. 11. Технологическая схема снижения расхода концентрата при обработке подземных вод с использованием установки обратного осмоса:

- 1 – резервуар исходной воды (после предочистки, обезжелезивания и добавления ингибиторов);
- 2 – рабочий насос высокого давления; 3 – аппарат обратного осмоса первой ступени;
- 4 – аппарат нанофильтрации второй ступени; 5 – сборный бак концентрата второй ступени;
- 6 – рабочий насос второй ступени; 7 – нанофильтрационный аппарат-«концентратор» третьей ступени; 8 – реактор-отстойник с «затравочными» кристаллами; 9 – бак с едким натром;
- 10 – насос-дозатор едкого натра; 11, 12 – регулирующие вентили

Fig. 11. Technological scheme for reducing the consumption of concentrate when treating groundwater using a reverse osmosis unit:

- 1 – reservoir of source water (after pretreatment, deferrization and addition of inhibitors);
- 2 – working high pressure pump; 3 – first stage reverse osmosis apparatus; 4 – second stage nanofiltration apparatus; 5 – collecting tank of the second stage concentrate; 6 – working pump of the second stage;
- 7 – nanofiltration apparatus - "concentrator" of the third stage; 8 – reactor-settler with "seed" crystals;
- 9 – caustic soda tank; 10 – caustic soda dosing pump; 11, 12 – control valves

Заключение

Описанный подход к созданию систем водоснабжения и очистки сточных вод может быть использован при создании систем водного хозяйства объектов, удаленных от водопроводных и канализационных сетей, а также водоемов, в которые может быть осуществлен сброс очищенных сточных вод. На рис. 12 по-

казана схема питьевого и технического водоснабжения, очистки сточных вод и их повторного использования на насосной станции перекачки газа (предприятия Газпрома). Очищенная с применением обратного осмоса сточная вода используется для подпитки сети оборотного водоснабжения (охлаждения оборудования) и полива зеленых насаждений.

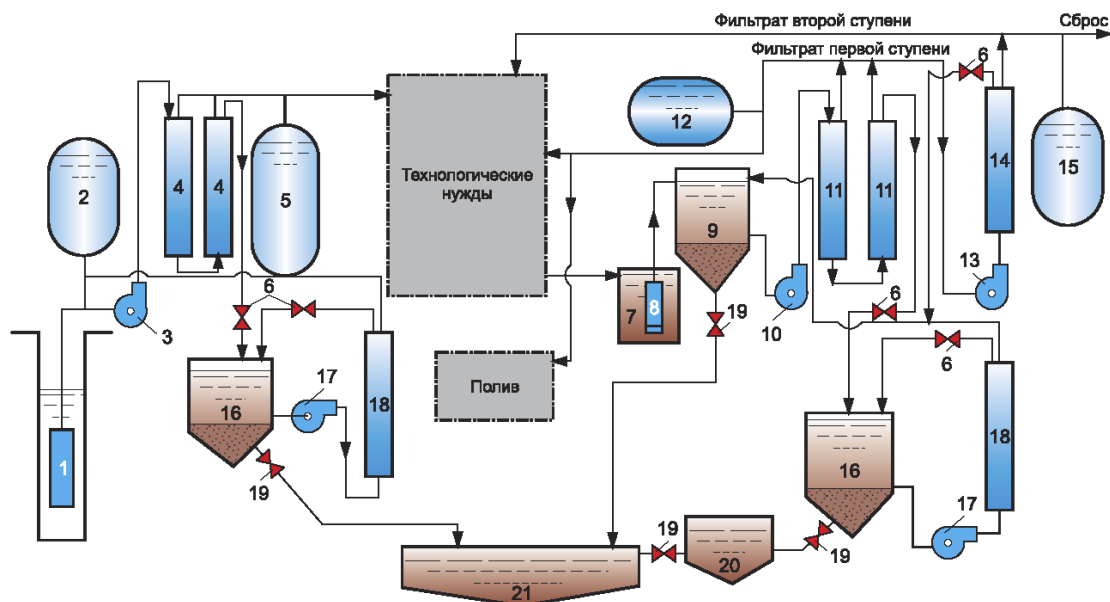


Рис. 12. Технологическая схема комплексного использования систем мембранной очистки для водоподготовки, очистки и повторного использования сточных вод:

1 – скважинный насос; 2 – бак-гидроаккумулятор исходной воды; 3 – рабочий насос установки водоподготовки; 4 – мембранные аппараты водоподготовки; 5 – бак-гидроаккумулятор очищенной воды; 6 – регулирующие вентили; 7 – приемок сбора сточной воды; 8 – насос подачи сточных вод на очистку; 9 – бак-отстойник первой ступени установки очистки сточных вод; 10 – насос первой ступени установки очистки сточных вод; 11 – мембранные аппараты первой ступени; 12 – бак-гидроаккумулятор фильтрата первой ступени; 13 – насос второй ступени; 14 – мембранные аппараты второй ступени; 15 – бак-гидроаккумулятор фильтрата второй ступени; 16 – бак-отстойник концентрата второй ступени; 17 – насос установки концентрирования; 18 – мембранный аппарат установки концентрирования; 19 – краны сброса осадка; 20 – септик; 21 – иловые площадки

Fig. 12. Technological scheme for the integrated use of membrane treatment systems for water treatment, purification and reuse of wastewater:

1 – borehole pump; 2 – source water hydroaccumulator tank; 3 – working pump of the water treatment plant; 4 – membrane water treatment devices; 5 – purified water accumulator tank; 6 – control valves; 7 – waste water collection pit; 8 – pump for supplying wastewater for treatment; 9 – settling tank of the first stage of the wastewater treatment plant; 10 – pump of the first stage of the wastewater treatment plant; 11 – membrane devices of the first stage; 12 – first stage filtrate accumulator tank; 13 – second stage pump; 14 – second stage membrane devices; 15 – second stage filtrate accumulator tank; 16 – second stage concentrate settling tank; 17 – pump of the concentration unit; 18 – membrane apparatus of the concentration unit; 19 – sludge discharge valves; 20 – septic tank; 21 – sludge platforms

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально обоснованы возможности получения очищенной воды из подземной и сточной с минимальным расходом воды (не более 0,5–1 % от расхода очищенной воды) на «собственные нужды» станции очистки.

2. Сбросы от установок водоподготовки и очистки сточных вод представляют собой влажные осадки солей (карбоната кальция и сульфата кальция), взвешенных веществ и концентрированные растворы солей хлоридов аммония и натрия.

3. Для сокращения расходов сточных вод использована новая разработанная авторами

технология «разделения» многокомпонентных растворов концентратов на компоненты с применением мембран.

4. Применение разработанных технологий позволяет предотвратить загрязнение окру-

жающей среды сточными водами жилых объектов при их строительстве в удалении от водопроводных и канализационных сетей и осуществлять вывоз малых объемов отходов автотранспортом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lei Jiang, Yue Tu, Xiangmin Li, Haixiang Li. Application of reverse osmosis in purifying drinking water // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 38. p. 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183801037>.
2. Ghoufi A., Dražević E., Szymczyk A. Interactions of Organics within Hydrated Selective Layer of Reverse Osmosis Desalination Membrane: A Combined Experimental and Computational Study // Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 51 (5). p. 2714-2719. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05153>.
3. Scholes R. C., Stiegler A. N., Anderson C. M., Sedlak D. L. Enabling Water Reuse by Treatment of Reverse Osmosis Concentrate: The Promise of Constructed Wetlands // ACS Environmental Au. 2021. Vol. 1 (1). p. 7-17. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00013>.
4. Ngai Yin Yip, Brogioli D., Hamelers H. V. M., Nijmeijer K. Salinity Gradients for Sustainable Energy: Primer, Progress, and Prospects // Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 50 (22). p. 12072-12094. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03448>.
5. Marron E. L., Mitch W. A., von Gunten U., Sedlak D. L. A Tale of Two Treatments: The Multiple Barrier Approach to Removing Chemical Contaminants During Potable Water Reuse // Accounts of Chemical Research. 2019. Vol. 52 (3). p. 615-622. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00612>.
6. Mahto A., Mondal D., Poliseti V., Bhatt J., Nidhi M. R., Prasad K., et al. Sustainable Water Reclamation from Different Feed Streams by Forward Osmosis Process Using Deep Eutectic Solvents as Reusable Draw Solution // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56 (49). p. 14623-14632. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03046>.
7. Yawei Du, Haoran Gu, Xinyu Sun, Huining Deng, Lixin Xie, Yan Liu. Simultaneous Optimization of Size and Operation for Seawater Reverse Osmosis Network with Permeate Split and Interstage Permeate Split Designs // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60 (10). p. 4041-4059. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c06163>.
8. Pervov A., Xuan Quyet Nguyen. Application of reverse osmosis and nanofiltration techniques at municipal drinking water facilities // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. p. 06004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706004>.
9. Pranić M., Kimani E. M., Biesheuvel P. M., Porada S. Desalination of Complex Multi-Ionic Solutions by Reverse Osmosis at Different pH Values, Temperatures, and Compositions // ACS Omega. 2021. Vol. 6 (30). p. 19946-19955. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02931>.
10. Davenport D. M., Deshmukh A., Werber J. R., Elimelech M. High-Pressure Reverse Osmosis for Energy-Efficient Hypersaline Brine Desalination: Current Status, Design Considerations, and Research Needs // Environmental Science and Technology Letters. 2018. Vol. 5 (8). p. 467-475. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00274>.
11. Zhangxin Wang, Dejun Feng, Yuanmiaoliang Chen, Di He, Elimelech M. Comparison of Energy Consumption of Osmotically Assisted Reverse Osmosis and Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis for Brine Management // Environmental Science and Technology. 2021. Vol. 55 (15). p. 10714-10723. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01638>.
12. Cappelle M., Walker W. Sh., Davis T. A. Improving Desalination Recovery Using Zero Discharge Desalination (ZDD): A Process Model for Evaluating Technical Feasibility // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56 (37). p. 10448-10460. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02472>.
13. Bartholomew T. V., Siefert N. S., Mauter M. S. Cost Optimization of Osmotically Assisted Reverse Osmosis // Environmental Science and Technology. 2018. Vol. 52 (20). p. 11813-11821. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02771>.
14. Xianhui Li, Hasson D., Semiat R., Shemer H. Intermediate concentrate demineralization techniques for enhanced brackish water reverse osmosis water recovery – A review // Desalination. 2019. Vol. 466. p. 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.004>.
15. Fengmin Du, Warsinger D. M., Urmi T. I., Thiel G. P., Kumar A., Lienhard V. J. H. Sodium Hydroxide Production from Seawater Desalination Brine: Process Design and Energy Efficiency // Environmental Science and Technology. 2018. Vol. 52 (10). p. 5949-5958. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01195>.

16. Massons-Gassol G., Gilabert-Oriol G., Johnson J., Arrowood T. Comparing Biofouling Development in Membrane Fouling Simulators and Spiral-Wound Reverse Osmosis Elements Using River Water and Municipal Wastewater // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56 (40). p. 11628-11633. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03219>.

17. Kaili Zhang, Yuehong Zhao, Hongbin Cao, Hao Wen. Optimization of the Water Network with Single and Double Outlet Treatment Units // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56 (10). p. 2865-2871. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04263>.

REFERENCES

1. Lei Jiang, Yue Tu, Xiangmin Li, Haixiang Li. Application of reverse osmosis in purifying drinking water. *E3S Web of Conferences*. 2018;38:01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183801037>.
 2. Ghoufi A, Dražević E, Szymczyk A. Interactions of Organics within Hydrated Selective Layer of Reverse Osmosis Desalination Membrane: A Combined Experimental and Computational Study. *Environmental Science and Technology*. 2017;51(5):2714-2719. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05153>.
 3. Scholes RC, Stiegler AN, Anderson CM, Sedlak DL. Enabling Water Reuse by Treatment of Reverse Osmosis Concentrate: The Promise of Constructed Wetlands. *ACS Environmental Au*. 2021;1(1):7-17. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00013>.
 4. Ngai Yin Yip, Brogioli D, Hamelers HVM, Nijmeijer K. Salinity Gradients for Sustainable Energy: Primer, Progress, and Prospects. *Environmental Science and Technology*. 2016;50(22):12072-12094. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03448>.
 5. Marron EL, Mitch WA, von Gunten U, Sedlak DL. A Tale of Two Treatments: The Multiple Barrier Approach to Removing Chemical Contaminants During Potable Water Reuse. *Accounts of Chemical Research*. 2019;52(3):615-622. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00612>.
 6. Mahto A, Mondal D, Poliseti V, Bhatt J, Nidhi MR, Prasad K, et al. Sustainable Water Reclamation from Different Feed Streams by Forward Osmosis Process Using Deep Eutectic Solvents as Reusable Draw Solution. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017;56(49):14623-14632. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03046>.
 7. Yawei Du, Haoran Gu, Xinyu Sun, Huining Deng, Lixin Xie, Yan Liu. Simultaneous optimization of size and operation for seawater reverse osmosis network with permeate split and inter-stage permeate split designs. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021;60(10):4041-4059. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c06163>.
 8. Pervov A, Xuan Quyet Nguyen. Application of reverse osmosis and nanofiltration techniques at municipal drinking water facilities. *E3S Web of Conferences*. 2019;97:06004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706004>.

9. Pranić M, Kimani EM, Biesheuvel PM, Porada S. Desalination of Complex Multi-Ionic Solutions by Reverse Osmosis at Different pH Values, Temperatures, and Compositions. *ACS Omega*. 2021;6(30):19946-19955. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02931>.
 10. Davenport DM, Deshmukh A, Werber JR, Elimelech M. High-pressure reverse osmosis for energy-efficient hypersaline brine desalination: current status, design considerations, and research needs. *Environmental Science and Technology Letters*. 2018;5(8):467-475. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00274>.
 11. Zhangxin Wang, Dejun Feng, Yuanmiaoliang Chen, Di He, Elimelech M. Comparison of Energy Consumption of Osmotically Assisted Reverse Osmosis and Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis for Brine Management. *Environmental Science and Technology*. 2021;55(15):10714-10723. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01638>.
 12. Cappelle M, Walker WSh, Davis TA. Improving Desalination Recovery Using Zero Discharge Desalination (ZDD): A Process Model for Evaluating Technical Feasibility. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017;56(37):10448-10460. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02472>.
 13. Bartholomew TV, Siefert NS, Mauter MS. Cost Optimization of Osmotically Assisted Reverse Osmosis. *Environmental Science and Technology*. 2018;52(20):11813-11821. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02771>.
 14. Xianhui Li, Hasson D, Semiat R, Shemer H. Intermediate concentrate demineralization techniques for enhanced brackish water reverse osmosis water recovery – A review. *Desalination*. 2019;466:24-35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.004>.
 15. Fengmin Du, Warsinger DM, Urmi TI, Thiel GP, Kumar A, Lienhard V JH. Sodium Hydroxide Production from Seawater Desalination Brine: Process Design and Energy Efficiency. *Environmental Science and Technology*. 2018;52(10):5949-5958. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01195>.
 16. Massons-Gassol G, Gilabert-Oriol G, Johnson J, Arrowood T. Comparing Biofouling Development in Membrane Fouling Simulators and Spi-

ral-Wound Reverse Osmosis Elements Using River Water and Municipal Wastewater. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017;56(40):11628-11633.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03219>.

17. Kaili Zhang, Yuehong Zhao, Hongbin Cao, Hao Wen. Optimization of the Water Network with Single and Double Outlet Treatment Units. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017;56(10):2865-2871.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04263>.

Информация об авторах

Information about the authors

Д. В. Спицов,

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6252-9485>

Dmitriy V. Spitsov,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Water Supply and Water Disposal, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6252-9485>

А. В. Саймуллов,

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-9760>

Aleksei V. Saymullov,

Postgraduate student of the Department of Water Supply and Water Disposal, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-9760>

А. Г. Первов,

доктор технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7518-2342>

Alexey G. Pervov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Water Supply and Water Disposal, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7518-2342>

Вклад авторов

Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021.
Одобрена после рецензирования 20.10.2021.
Принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 23.09.2021.
Approved after reviewing 20.10.2021.
Accepted for publication 25.10.2021.