

# Радикальное сокращение расходов воды на собственные нужды установок подготовки питьевой воды из подземных водоисточников

**Спицов Дмитрий Владимирович,**

кандидат технических наук, профессор кафедры "Инженерное оборудование зданий", ФГБОУ ВО "Московский архитектурный институт (государственная академия)", dvs43000@yandex.ru

**Ширкова Татьяна Николаевна,**

аспирант кафедры "Водоснабжение и водоотведение", ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет", tshirkova@projectmast.ru

**Первов Алексей Германович,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Водоснабжение и водоотведение", ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет", ale-pervov@yandex.ru

Описан новый подход к созданию технологических схем обезжелезивания и умягчения подземных вод с применением мембранной технологии. Для случаев, когда на водозаборных сооружениях нет возможности для сброса воды для "собственных нужд" станции очистки воды, предложена технология утилизации концентрата установок обратного осмоса, состоящая в обработке концентрата в две ступени и осаждении карбоната кальция на "затравочных" кристаллах в реакторе-отстойнике, что позволяет уменьшить расход воды "на собственные нужды" станции менее 0,5 % от общего расхода воды, поступающего на очистку. Удаление сточных вод водоочистной установки проводится с помощью вывоза их автотранспортом. Представлены результаты экспериментов по определению технологических показателей мембранных установок (скоростей образования осадка в зависимости от величины выхода фильтрата, от типа мембран). Представлены значения эксплуатационных затрат на очистку воды и расходов сточных вод для станции очистки подземных вод производительностью 1700 куб.м в сутки. С помощью экспериментально полученных зависимостей скоростей роста осадка карбоната кальция показано, что при использовании разработанной технологии значения скоростей образования осадка карбоната кальция в аппаратах разработанной установки имеют значительно более низкие значения, чем при использовании традиционной технологии с применением обратноосмотических мембран. При разработке установок следует отдавать предпочтение применению нанофильтрационных мембран с низкой селективностью, что обеспечивает не только меньшую величину энергопотребления, но и низкие расходы на реагенты.

Ключевые слова: подземные воды, умягчение воды, расход воды "на собственные нужды" станции, обратный осмос, нанофильтрация, сокращение расхода концентрата, осадкообразование на мембранах, осадки малорастворимых в воде солей, карбонат кальция, осаждение на "затравочных" кристаллах, ингибиторы осадкообразования, скорость роста осадка.

В настоящее время метод обратного осмоса широко известен как эффективный метод опреснения воды и водоподготовки для различных отраслей промышленности. Обратный осмос также оказался чрезвычайно эффективен для подготовки воды питьевого качества при снижении таких показателей как жесткость, концентрации аммония, стронция, фторидов. Однако широкое применение этого мембранного метода в крупных системах централизованного городского водоснабжения пока делает только «первые шаги». Основные проблемы, с которыми сталкиваются сотрудники городских водоканалов при использовании установок обратного осмоса для умягчения подземных вод – это высокие эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью закупки сервисных реагентов и необходимостью утилизации или сброса в городскую канализацию концентратов мембранных установок [1-5].

Для экономического обоснования разработанных авторами рекомендаций ниже в статье приведены примеры определения эксплуатационных затрат для установок производства питьевой воды из подземных водоисточников с повышенным содержанием ионов жесткости и железа. За основу принята технологическая схема, используемая на ВЗУ (Водозаборный узел) г. Люберцы Московской области для обработки воды с жесткостью 12 мг-экв/л. Для умягчения воды используется метод обратного осмоса. Такая технология в настоящее время начинает широко применяться Московским Водоканалом для подготовки питьевой воды из подземных водозаборов на территории Новой Москвы.

В соответствии с разработанной технологией (рис. 1) вода из скважины сначала подвергается обезжелезиванию путем аэрации с последующим фильтрованием. Часть воды после прохождения процесса обезжелезивания поступает на установку обратного осмоса. Фильтрат установки обратного осмоса (с расходом 50 куб.м в час) с величиной общей жесткости, не превышающей значение 0,5 мг-экв/л, поступает в резервуар чистой воды, где смешивается с исходной обезжелезенной водой (с расходом 50 куб.м /час). В результате смешения получается вода с величиной общей жесткости 6,1 мг/л. Для предотвращения образования осадков карбоната кальция на мембранах в исходную воду дозируется раствор ингибитора, доза которого составляет 10 мл/куб.м. Кроме того, для удаления образующегося на мембранах осадка карбоната кальция предусмотрено регулярное проведение химических промывок мембран. При этом, величина выхода фильтрата (для фильтрата от общего расхода поступающей на очистку воды) составляет 66 %, т.е. расход концентрата составляет не менее 1/3 части от расхода воды, поступающей на установку обратного осмоса. Это объясняется высокой жесткостью исходной воды и опасностью образования на мембранах кристаллических осадков карбоната кальция, даже несмотря на применение ингибитора. Сокращение расходов концентратов является важной задачей при исполь-

*Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 19-08-00982 А).*

зовании мембранных установок [5-12]. Чем больше расход концентрата, т.е., чем меньше величина выхода фильтрата на установке, тем меньше оказывается величина пересыщения по карбонату кальция. Применение ингибиторов для контроля осадкообразования полностью не предотвращает, а лишь уменьшает скорость осадкообразования [13-16].

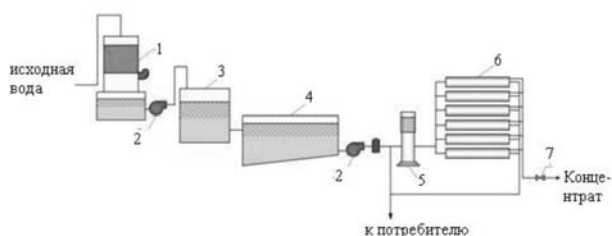


Рис.1 «Классическая» технология подготовки питьевой воды с использованием установок обратного осмоса: 1 – аэрация; 2 – насос; 3 – механические фильтры; 4 – бак сбора очищенной воды; 5 – насос высокого давления; 6 – установка обратного осмоса (УОО); 7 – регулировочный вентиль

Для предотвращения образования на мембранах отложений малорастворимых в воде веществ (карбоната кальция) в исходную воду дозируются ингибиторы [17 - 36].

Дозы ингибиторов составляют 10-15 мг/л исходной воды. Ингибиторы поставляются в виде растворов, содержащих от 20 до 30 % сухого вещества. Стоимость поставки ингибирующих растворов от разных производителей и поставщиков составляет от 200 до 300 тысяч рублей за тонну, поэтому ингибитор составляет существенную часть годовых эксплуатационных затрат.

Выбор характеристик мембран оказывает существенное значение на величину эксплуатационных затрат [23-26]. Как показывает опыт эксплуатации мембранных установок при очистке подземных вод, селективность мембран оказывает существенное влияние не только на состав очищенной воды и эффективность очистки, но и на стоимость сервисных мероприятий. Чем ниже селективность мембран, тем меньше оказывается интенсивность образования осадков малорастворимых солей на мембранах [27]. Поэтому для снижения расходов на очистку воды и для снижения расходов концентратов, в описанных в настоящей статье разработках применены нанофильтрационные мембраны. Применение нанофильтрационных мембран не только позволяет снизить скорость осадкообразования на мембранах, но и уменьшить дозу ингибитора до значения 1 мг/л, что существенно снижает величину эксплуатационных затрат.

Наличие сбросных расходов концентратов создает серьезные проблемы при использовании мембранных установок для целей питьевого водоснабжения. Решение проблемы сокращения расхода концентрата и его утилизации позволяет значительно сократить расходы на очистку воды [6,7].

В [9-12] были описаны разработки кафедры Водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ для сокращения расходов воды на собственные нужды мембранных установок. Для уменьшения расхода концентрата в новых разработках использовались специальные дополнительные мембранные аппараты второй ступени. Аппараты второй ступени используются специально для

снижения расхода концентрата еще в 3-4 раза по сравнению с расходом концентрата при выходе фильтрата 60-70%. Таким образом, расход концентрата после обработки на второй ступени составит не более 5-10%. В соответствии с разработанной технологией концентрат после опреснительной установки проходит обработку с применением нанофильтрационных мембран. При этом фильтрат нанофильтрационных мембран смешивается с исходной водой и поступает в опреснительную установку. Применение нанофильтрационных мембран, как уже говорилось выше [9-12], снижает риск образования отложений карбоната кальция в мембранных аппаратах.

Для дальнейшего уменьшения расхода концентрата до величины, составляющей (0,5 - 1)% от расхода исходной воды, используется разработанная авторами технология, состоящая в пропуске концентрата через реактор, заполненный кристаллами карбоната кальция. Принципы работы технологии снижения расхода концентрата показаны на рис.2. При прохождении концентрата мембранной установки через взвешенный слой кристаллического осадка карбоната кальция происходит рост кристаллов карбоната, при этом значения концентраций кальция и бикарбонат-ионов в концентрате уменьшаются. Это дает возможность дальнейшей обработки с применением нанофильтрационных мембран без опасности интенсивного образования на мембранах карбоната кальция.

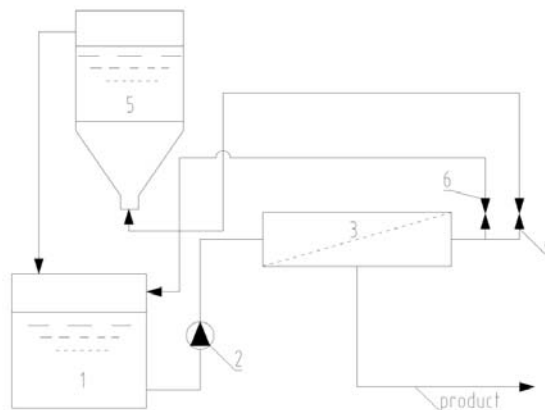


Рис.2 Схема применения реактора с кристаллами карбоната кальция для снижения расхода концентрата установок обратного осмоса.

1 - бак исходной воды; 2 - рабочий насос высокого давления; 3 - обратноосмотический аппарат; 4 - регулирующий давление вентиль; 5 - реактор с кристаллами; 6 - вентиль бай-паса

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Настоящая работа предлагает новейшую разработку, позволяющую радикально решить проблему сточных вод - уменьшить расход "на собственные нужды"; обоснованный подход к выбору сервисных реагентов для мембранных станций очистки воды с целью снижения эксплуатационных затрат.

Эксперименты проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 3. Работа лабораторного стенда проводилась в режиме циркуляции. Исходная вода помещалась в бак исходной воды 1 емкостью 50 л. Из бака исходной воды вода насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3. Использовались

рулонные мембранные элементы стандарта 4040 с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами производства компании CSM (Корея): модели BLN 4040, 4040 90NE и 4040 70 NE. Концентрат после мембранного аппарата возвращался в бак 1, а фильтрат сбрасывался в канализацию. Рабочее давление и расход концентрата регулировались с помощью регулируемого вентиля 12, установленного на линии концентрата. Величина рабочего давления составляла 9 - 12 бар. Отбор проб циркулирующего раствора осуществлялся из бака 1. Состав исходной подземной воды представлен ниже в Таблице 1.

Таблица 1  
Составы воды, очищенной с помощью мембран и смешения с исходной водой

Показатель	Ед. изм	После обезжелезивания и обратного осмоса (ОО)			После обезжелезивания и нанофильтрации (НФ)			После нанофильтрации (НФ)	
		После обезжелезивания	После ОО	После смешения с исходной водой 0,75:0,25	После обезжелезивания	После НФ	После смешения с исходной водой 0,75:0,25	исходная	очищенная
Жесткость общая	мг-экв/л	10,5	0,5	7,0	10,5	3,5	7,0	10,5	3,5
Na <sup>+</sup>	мг-экв/л	2,5	0,2	2,0	2,5	0,8	1,6	2,5	0,8
Cl <sup>-</sup>	мг-экв/л	2,5	0,3	2,1	2,5	0,8	1,7	2,5	0,8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг-экв/л	3,0	0,05	2,45	3,0	0,3	1,6	3,0	0,3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг-экв/л	7,5	0,35	5,7	7,5	2,5	5,0	7,5	2,5
Fe <sup>2+</sup>	мг/л	0,1	0,01	0,01	0,1	0,2	0,15	1,0	0,25
F <sup>-</sup>	мг/л	1,6	0,1	1,24	1,6	0,6	1,1	1,6	0,55

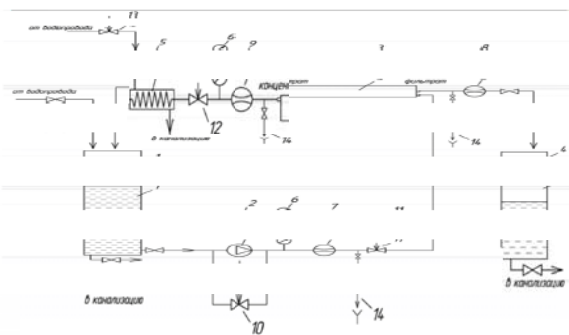


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 – бак исходной воды; 2 – бак сбора фильтрата; 3 – нанофильтрационный аппарат; 4 – манометр; 5 – вентиль регулировки давления; 6 – насос

Определение скорости образования осадка карбоната кальция в мембранных аппаратах производилось в соответствии с методикой, разработанной авторами ранее [25,27]. Количество образовавшегося осадка в процессе эксперимента рассчитывалось как разница между количеством кальция в баке 1 в начале эксперимента и

количеством кальция в концентрате в баке 1 в заданный момент времени [25].

Количества образовавшегося осадка карбоната кальция представлялось в виде графиков зависимости от времени и от величины К, где К определяется как соотношение объема в баке 1 в начальный момент времени к объему воды в заданный момент времени. Значения скоростей образования карбоната кальция определялись как значения тангенса угла наклона касательной к кривой графика зависимости количества образовавшегося осадка от времени эксперимента. На рис. 4 представлены результаты определения скоростей образования карбоната кальция в рулонных элементах типа 4040 с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами. На рис.4 показаны результаты экспериментального определения скоростей осадкообразования карбоната кальция в аппаратах с различными типами мембран при различных условиях эксплуатации (при различных величинах рабочего давления). На рисунках 5 и 6 показаны зависимости концентраций кальция, железа и величины общего соледержания в фильтрате нанофильтрационной мембранной установки в зависимости от условий ее эксплуатации. На основании проведенных экспериментов проведен поиск оптимальных условий эксплуатации мембранной нанофильтрационной установки производительностью 40 куб.м в час, используемой для очистки подземной воды. В зависимости от выбранной величины рабочего давления рассчитывались значения скоростей осадкообразования, расхода ингибиторов и моющих реагентов, затраты на электроэнергию и замену мембранных элементов 1 раз в 5 лет. Результаты определения оптимального значения рабочего давления для обработки подземных вод с применением нанофильтрационных мембран 70NE. При разработке технологии очистки воды использовались разработки по сокращению расхода концентрата путем его умягчения при контакте с "затравочными" кристаллами. Для получения "затравочных" кристаллов исходная вода концентрировалась на лабораторной установке в 10 раз (объем исходной воды в баке 1 (рис.3) сокращался в 10 раз, с 10 л до 1 литра. В сконцентрированную воду добавлялось 50 мл 0,1н раствора NaOH. Для определения эффективности удаления кальция при контакте с "затравочными" кристаллами исходная вода концентрировалась в 10 раз по объему, и раствор концентрата смешивался с полученным осадком карбоната кальция. Результаты удаления из воды кальция представлены в Таблице 2.

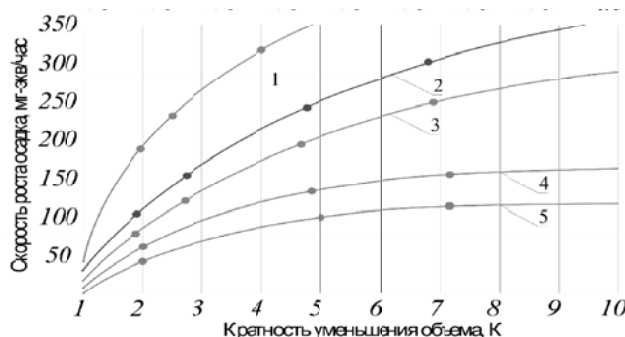


Рис. 4. Результаты определения скоростей образования карбоната кальция в мембранных аппаратах: изменение скоростей осадкообразования в зависимости от К (кратности уменьшения объема концентрата в процессе эксперимента) для различных типов мембран и доз ингибиторов.

1 - мембраны BLN, без добавления ингибитора, рабочее давление - 16 Бар; 2 - мембраны BLN, доза ингибитора Аминат-К - 5 мг/л, рабочее давление - 16 Бар; 3 - мембраны 70NE, без добавления ингибитора, рабочее давление - 16 Бар; 4 - мембраны 70NE, доза ингибитора Аминат-К - 1 мг/л, рабочее давление 16 Бар; 5 - мембраны 70NE, доза ингибитора Аминат-К - 1 мг/л, рабочее давление - 6 Бар.

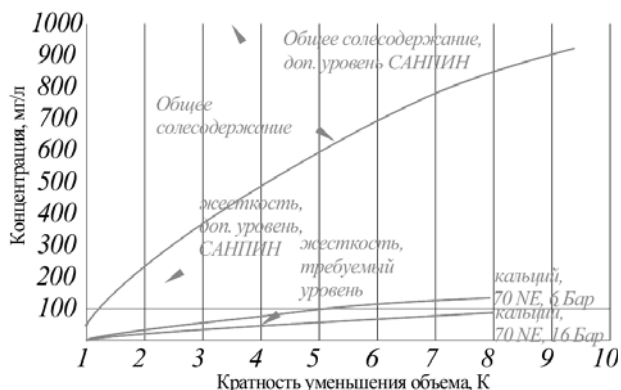


Рис. 5. Зависимости концентрации кальция и величины общего солевого содержания фильтрата нанофильтрационных мембран в зависимости от K и рабочего давления

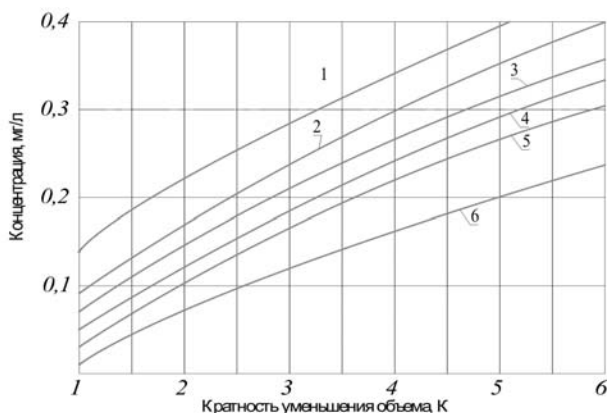


Рис. 6. Зависимости содержания железа в фильтрате нанофильтрационных мембран 70NE от величины K (кратность уменьшения объема исходной воды в процессе эксперимента).

1 - Fe = 1,5 мг/л, давление - 6 Бар; 2 - Fe = 1 мг/л, давление - 6 Бар; 3 - Fe = 1,5 мг/л, давление 16 Бар; 4 - Fe = 1 мг/л, давление 16 Бар; 5 - Fe = 0,5 мг/л, давление - 6 Бар; 6 - Fe = 0,5 мг/л, давление - 16 Бар

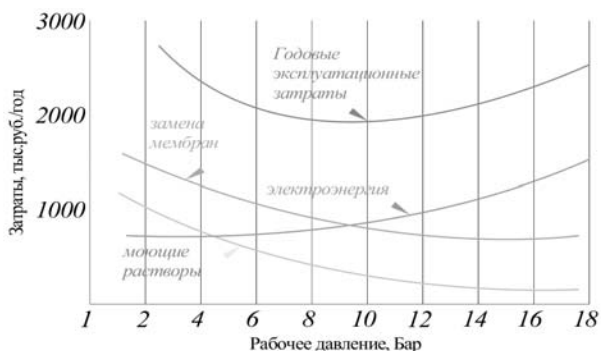


Рис. 7. Зависимость годовых эксплуатационных затрат для мембранной установки производительностью 40 куб.м в час от величины рабочего давления: поиск оптимальной величины рабочего давления

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На интенсивность образования осадка карбоната кальция на мембранах большое влияние оказывает селективность мембран. При использовании нанофильтрационных мембран с селективностью 70 и 90 процентов скорость образования осадка оказывается значительно ниже, чем в случае использования обратноосмотических мембран [25]. На рис. 4 представлены результаты определения скоростей образования осадка в рулонных элементах типа 4040 BLN, 4040 90 NE и 4040 70 NE соответственно с обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами, с добавлением ингибитора Аминат-К в исходную воду и без. Как видно из рисунка, при обработке воды мембранами с низкой селективностью интенсивность образования осадка в мембранных аппаратах снижается, что повышает надежность работы мембранных установок и сокращает эксплуатационные затраты на промывку мембран. Составы исходной воды и питьевой воды, полученной с применением различных мембран, до и после смешения, приведены в Таблице 1. В случае применения обратноосмотических мембран соотношение расходов исходной обезжелезненной воды и фильтрата составляет 70 : 30, а в случае применения нанофильтрационных мембран 70 NE составляет 50 : 50.

В Таблице 2 представлены: состав исходной воды, состав концентрата установки, а также составы концентрата после дополнительной ступени концентрирования и после контакта со слоем осадка кристаллов карбоната кальция. Для утилизации концентрата установки может быть использован контакт концентрата с осадком карбоната кальция в режиме циркуляции. После прохождения концентрата через слой осадка карбоната кальция (рис.2), он собирается в бак и направляется в установку нанофильтрации для дальнейшего сокращения расхода. На рис.8 и 9 представлены зависимости концентраций кальция и величины общего солевого содержания в фильтрате и концентрате установки нанофильтрации при обработке концентрата на установке утилизации концентрата. Как видно на рис. 9, после контакта с осадком кальциевая жесткость снижается на 35-40%. При этом снижаются также скорости образования карбоната кальция в мембранных аппаратах. Как следует из рис.10, при использовании низкоселективных нанофильтрационных мембран, скорости роста осадка карбоната кальция в мембранных аппаратах с нанофильтрационными мембранами оказываются значительно ниже, чем в традиционно применяемых для очистки подземных вод аппаратах с обратноосмотическими мембранами.

Таблица 2

Составы исходной воды и концентрата установки после контакта с "затравочными" кристаллами

Показатель	Ед. изм.	Исходная вода	Концентрат	Концентрат после контакта с "затравкой"
Ca <sup>2+</sup>	мг-экв/л	9,0	80	42,2
Mg <sup>2+</sup>	мг-экв/л	1,5	11,5	11,5
Na <sup>+</sup>	мг-экв/л	2,5	19,5	19,5
Cl <sup>-</sup>	мг-экв/л	2,5	21,1	21,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг-экв/л	3,0	26,1	26,1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг-экв/л	7,5	58	36,1
Fe <sup>2+</sup>	мг/л	1,0	-	-
F <sup>-</sup>	мг/л	1,6	-	-
Электропроводность	мкСм/см	630	4700	3900



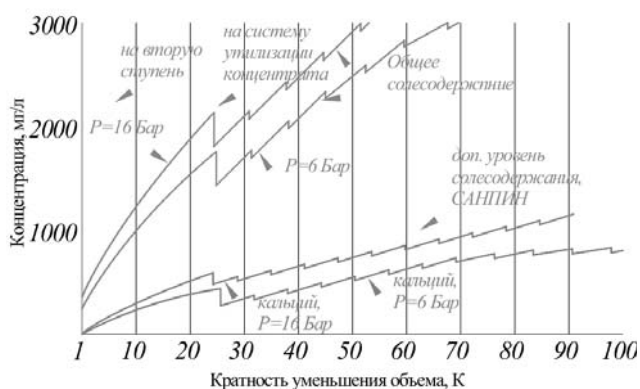


Рис. 8. Зависимости концентрации иона кальция и величины общего солесодержания в фильтрате наночувствительной от величин  $K$  и рабочего давления: на первой ступени получения питьевой воды; на второй ступени обработки концентрата и в установке утилизации концентрата

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты использованы при разработке системы подготовки питьевой воды на ВЗУ г. Видное. По требованию заказчика проект предусматривал применение такой технологии, которая позволила бы сократить расход воды на "собственные нужды" станции очистки воды до величины, позволяющей вывозить сточные воды и осадок автотранспортом.

Анализ полученных экспериментальных зависимостей (рис.11) позволяет произвести расчет общей поверхности мембран для осуществления снижения расхода концентрата до величины, не превышающей 1% расхода исходной воды. Для этого производительность мембран в процессе снижения объема исходной воды представлена как функция от объема фильтрата (а) и величины  $K$  (б). Для определения необходимой площади мембран весь диапазон изменения величины  $K$  (от 1 до 100) был условно разбит на отрезки (от 1 до 8, от 8 до 25, от 25 до 50, от 50 до 100) и в каждом диапазоне были определены значения величины средней удельной производительности мембран (рис. 11,в). Общая площадь мембран была определена как сумма площадей, требуемых для получения объема фильтрата, полученного в каждом диапазоне изменения  $K$ .

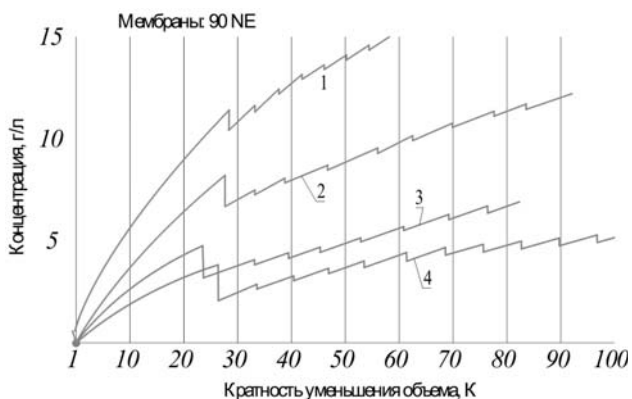


Рис.9. Зависимость концентрации ионов кальция и величины общего солесодержания в концентрате установки с наночувствительными мембранами от  $K$  для значений рабочего давления 6 и 16 Бар .

1 - общее солесодержание,  $P=16$  Бар; 2 - общее солесодержание,  $P=6$  Бар; 3 - кальций, давление 16 Бар; 4 - кальций, давление 6 Бар

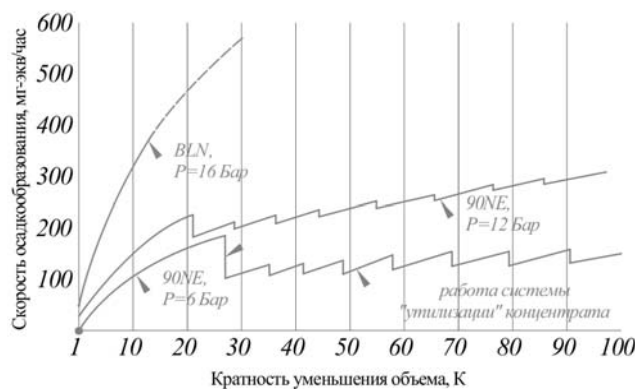


Рис. 10. Результаты определения скоростей образования карбоната кальция в аппаратах с мембранами типа BLN и 70 NE в зависимости от величины  $K$  при работе установки при сокращении расхода концентрата и его утилизации.

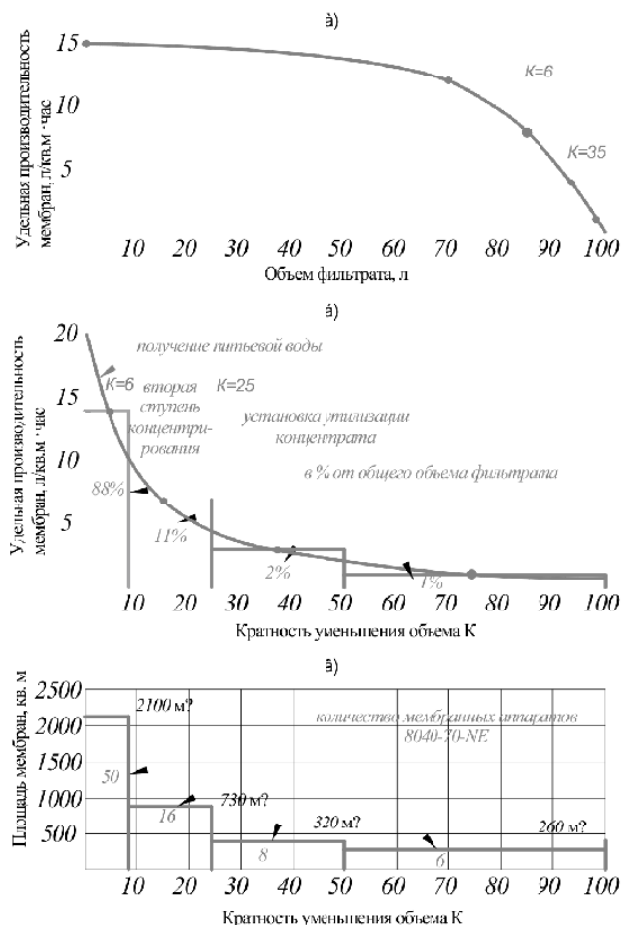


Рис.11. Пример определения необходимой площади поверхности мембран, требуемой для осуществления процессов: получения питьевой воды, сокращения расхода концентрата и утилизации концентрата при работе одного блока установки наночувствительной производительностью 20 куб.м в час:

а) зависимость величины удельной производительности мембран от объема фильтрата, полученного в процессе эксперимента при обработке 100 л исходной подземной воды;

б) зависимость величины удельной производительности мембран 70 NE от величины  $K$  в процессе эксперимента;

в) результаты определения площадей мембран, требуемых для обработки исходной воды в диапазонах изменения  $K$ : от 1 до 8; от 8 до 25; от 25 до 50; от 50 до 100.

В таблице 3 представлены результаты экономического обоснования различных технологических решений. Стоимости электроэнергии, ингибитора, моющих растворов и мембранных элементов представлены для различных схем:

Таблице 3  
Результаты определения эксплуатационных затрат различных схем очистки для установки производительностью 100 м<sup>3</sup>/ч

Виды затрат, показатели	Удельные затраты	Характеристики	Обезжелезивание – установка ОО	Обезжелезивание – установка ОО / НФ	Обезжелез. – установка НФ с утилизацией концентрата
Расход, м <sup>3</sup> /ч: - воды на обезжелезивание - на мембранную установку - концентрата			125 75 25	125 100 100 / 25	105 80 5
Затраты, руб/год					
Затраты на электроэнергию: - на обезжелезивание - на установку ОО - на установку НФ	2,5 руб/кВт·ч	0,4 <sub>3</sub> кВт·ч/м <sup>3</sup> 1,5 <sub>3</sub> кВт·ч/м <sup>3</sup> 0,8 <sub>3</sub> кВт·ч/м <sup>3</sup>	875 000 1 968 750	875 000 140 000	735 000 140 000
Затраты на ингибиторы (Аминат-К, Аметек)	240 руб/кг	доза: 30 мл/м <sup>3</sup> 4 мл/м <sup>3</sup> 2,5 мл/м <sup>3</sup>	1 260 000	504 000 315 000	315 000
Затраты на моющие растворы	320 руб/кг	промывка: 4 раза в год 3 раза в год 2 раза в год (2 кг/модуль)	256 000 192 000	128 000	153 000
Затраты на замену мембранных модулей	36000 42000 43000 руб/модуль	замена 1 раз в 6 лет, кол-во модулей: 100 100 20	600 000	700 000	700 000 143 000
Сброс в канализацию	10 <sub>3</sub> руб/м <sup>3</sup>		1 750 000	1 750 000	350 000

- с обезжелезиванием всей исходной воды, обработкой части воды с использованием установки обратного осмоса и последующим смешением обезжелезенной воды и фильтрата обратноосмотической установки (традиционная схема);

- с обезжелезиванием всей исходной воды и обработкой 50-ти процентов воды на установке наночистоты, смешением фильтрата и обезжелезенной воды, с обработкой концентрата на дополнительной ступени "утилизации" концентрата;

- с применением традиционной схемы с последующей обработкой концентрата в соответствии с разработанной технологией его "утилизации";

- с применением "напрямую" технологии наночистоты с последующей обработкой на дополнительной ступени "утилизации" концентрата. Применение технологии наночистоты позволяет снизить потребление ингибитора, а также на 25-30% снизить эксплуатационные затраты по сравнению с традиционным подходом применения обратного осмоса.

В Таблице 3 также показаны расходы сточных вод для каждой и представленных технологических схем.

Технологическая схема обработки подземной воды производительностью 1700 куб.м в сутки с сокращением расхода воды на "собственные нужды" до 5-6 куб.м в сутки показана на рис.12.

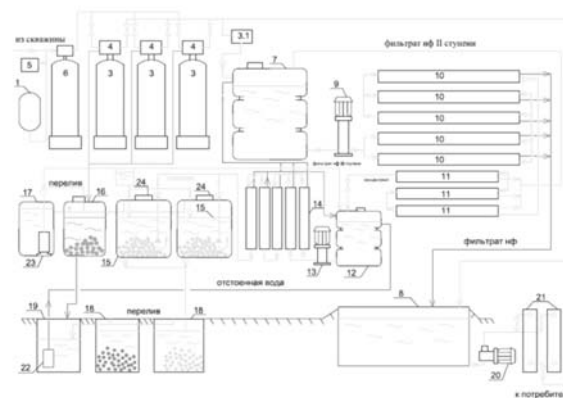


Рис. 12 Технологическая схема обработки подземной воды производительностью 1700 куб.м в сутки с сокращением расхода воды на "собственные нужды" до 5-6 куб.м в сутки

Вода из скважины под остаточным напором скважинного насоса 2-3 Бара поступает в фильтры обезжелезивания. Используются стандартные фильтры из стеклопластика 3 диаметром 900 мм с использованием управляющих клапанов 4. В фильтрах используется специальная каталитическая загрузка TMF (производства компании Райффил). Для обеспечения расхода 80 куб.м в час (1700 куб.м в сутки) используется 9 фильтров. Для окисления железа в исходной воде используется подача воздуха компрессором 5 с последующим окислением в смесителе-аэраторе 6. Обезжелезенная вода с расходом 40 куб.м в час (50% всей воды) поступает в бак обезжелезенной воды 7. Другая часть обезжелезенной воды (50%) поступает в резервуар чистой воды 8, где смешивается с умягченной водой после установки наночистоты в пропорции 1: 1. Из бака 7 вода рабочим насосом мембранной установки 9 подается в блок мембранной установки 10. Для обеспечения производительности 40 куб.м в час используются два многоступенчатых центробежных насоса с подачей 30 куб.м в час и напором 160 м. В каждый мембранный блок производительностью по 20 куб.м в час входят по 20 мембранных наночистотных аппаратов 11 типа 70 NE 8040 с наночистотными мембранами селективностью 70% производства фирмы CSM (Корея). Концентрат после аппаратов 10 с расходом 6 куб.м в час поступает в аппараты 11 для дальнейшего сокращения его расхода до величины 1 куб.м в час (для одного блока производительностью 20 куб.м в час). В блоке на 20 куб.м в час использовано 9 мембранных аппаратов типа 8040 с наночистотными мембранами с селективностью 70% по солям. Концентрат после аппаратов второй ступени 11 поступает в промежуточный бак 12 для дальнейшей утилизации концентрата.

Фильтрат после аппаратов второй ступени 11 имеет величину общего соледержания 300 мг/л и направляется в бак 7, смешиваясь с исходной водой. Из бака 12 рабочий насос 13 (подачей 2000 л/час и напором 16 Бар) забирает воду и направляет в специальные мембранные аппараты-концентраторы 14 с "открытым" каналом производства компании Waterlab [9]. В этих аппаратах специальное устройство мембранного канала позволяет пропускать по нему загрязненную воду, пересыщенную по карбонату кальция, без опасности образования на мембранах кристаллических отложений. В аппаратах 14 расход концентрата снижается до величины 100 литров в час. Фильтрат после аппаратов 14 поступает частично в бак 7 и частично - в бак 13. Установка утилизации концентрата с аппаратами 14 "обслуживает" две установки мембранной очистки (производительностью по 20 куб.м в час каждая) и рассчитана на обработку концентрата с расходом 2 куб.м в час. Концентрат после аппаратов 14 собирается в двух баках 15 емкостью по 1000 литров. Для уменьшения величины общего соледержания воды, находящейся в баке 15, используется высаживание из воды карбоната кальция на "затравке". Образование "затравочных" кристаллов производится путем периодического (1 раз в сутки) добавления в бак 15 раствора едкого натра (40%-ной концентрации) в количестве 1000 мл. Дозирование производится в автоматическом режиме из бачка 24. После контакта концентрата с массой "затравочных" кристаллов на них образуется карбонат кальция. Высаживание одного грамм -эквивалента карбоната кальция на "затравке" сокращает величину общего соледержания одного литра исходной воды на 40 мг, что существенно снижает величину соледержания воды, циркулирующей в установке утилизации концентрата и сокращает расходы электроэнергии. На баках 15 и 16 установлены переливы воды в бак 17, откуда вода погружным насосом 23 направляется в бак 12 на повторную обработку. Бак 15 используется для сбора и отстаивания воды после промывки фильтров обезжелезивания. После отстаивания 1 раз в сутки содержимое баков 15 и 16 сливается в подземные резервуары 18 для сбора и вывоза осадков (рис. 14). Для сокращения вывозимого объема осадков используется резервуар 19 для сбора переливной воды, которая из бака 19 погружным насосом 22 периодически направляется в бак 12. Количество осадка гидроокиси железа, удаляемого в сутки, составляет 4-5 кг. Из резервуара чистой воды 8 насосом второго подъема 20 вода направляется потребителю, предварительно пройдя обработку на ультрафиолетовых стерилизаторах 21.

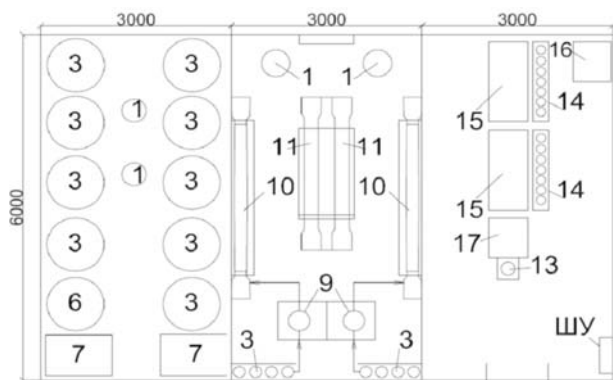


Рис. 13. Компоновочные решения станции обезжелезивания и умягчения подземной воды производительностью 1700 куб.м в сутки с сокращением расходов воды на "собственные нужды" до 5 куб.м в сутки.

## ВЫВОДЫ

1. От эффективности ингибитора зависит сумма эксплуатационных затрат.
2. Выбор типа ингибитора для каждого проекта по подготовке питьевой воды должен иметь научное обоснование.
3. Необходимо проведение экспериментов по определению скоростей осадкообразования.
4. Испытания ингибиторов следует проводить с применением различных типов мембран и выбирать вариант с меньшим значением скорости образования.
5. Снижение расхода концентрата – главное направление исследований, включающее подбор ингибиторов и мембран, обеспечивающих минимальное значение скоростей осадкообразования.

## Литература

1. Pena Garcia N., Rodriguez J., del Vigo F., Armstrong M., Fazel M., Chesters S. Results of a neutral pH cleaner that removes complex fouling and metals from membranes // The international Desalination Association World Congress - Sao Paolo, Brasil, 2017. REF: IDA 17 WC-37930\_PENA
2. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control scaling deposition in desalination plant // Desalination, 2015, v. 356, pp. 294-313.
3. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Ledion J., Cheap-Charpentier H., Homer O. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // Desalination, 2015, v. 356, pp. 47-55.
4. Yangali-Quintanilla V.A., Dominiak D.M., van de Ven W. A smart optimization of antiscalant dosing in water // The International Desalination Association World Congress - Sao Paolo, Brazil, REF: IDA17WC-58252\_Yangali-Quintanilla.
5. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production, V. 1, pp. 61-70, ISBN 0-86689-060-2, October 2000, Desalination Publications, L'Aquila, Italy.
6. Veespreni S., Bond R. Getting this last drop: new technology for treatment of concentrate // Tianjin IDA World Congress 2013 on Desalination and Water Reuse, October 20-25, China 2013, TIAN 13-357.
7. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jakobik-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // Desalination, 2017, v. 401, pp. 180-189.
8. Goodin B.D., Pinto J.M., Butow R.R. Back to the future: innovation and energy efficiency on a low TDS BWRO retrofit/expansion // The International Desalination Association World Congress - Sao Paolo, Brazil, REF: IDA17WC-58359\_Goodin.
9. Первов А.Г., Спицов Д.В., Андрианов А.П., Рудакова Л.В. Новые технологии и аппараты на основе методов ультра- и нанофильтрации для систем водоснабжения и теплоснабжения. Водоснабжение и санитарная техника. 2009, № 7.
10. Первов А.Г., Андрианов А.П., Юрчевский Е.Б. Совершенствование конструкций мембранных аппаратов. Водоснабжение и санитарная техника. 2009, № 7.
11. Первов А.Г., Андрианов А.П., Горбунова Т.П. Разработка мембранных технологий с уменьшенным расходом воды на собственные нужды. Водоснабжение и санитарная техника, 2010, № 6.



12. Pervov A. Precipitation of calcium carbonate in reverse osmosis retentate flow by means of seeded techniques – a tool to increase recovery // *Desalination*. 2015. V. 368. Pp. 140-151.
13. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // *Desalination*. 2014. V. 354. Pp. 30-38.
14. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies // *Desalination*. 2018. V. 425. Pp. 130-155.
15. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science Total Environ*. 2017. V. 595. Pp. 567-583.
16. Al-Roomi Y.M., Hussain K.F. Potential kinetic model of scaling and scale inhibition mechanism // *Desalination*. 2016. V. 393. Pp. 186-195.
17. Liu D., Dong W., Hiu F., Ledion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods // *Desalination*. 2014. V. 304. Pp. 1-10.
18. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // *Desalination*. 2017. V. 404. Pp. 224-229.
19. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pecoul N., Perrot H., Hubert L., Ledion J., Cheap-Charpentier H., Horner O. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article // *Desalination*. 2015. V. 356. P. 47-55.
20. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO<sub>4</sub> scaling on RO membranes // *Desalination*. 2018. V. 431. Pp. 119-125.
21. Borden J., Gilron J., Hasson D. Analysis of RO flux decline due to membrane surface blockage // *Desalination*. 1987. V. 66. P. 257-269.
22. Okazaki M., Kimura S. Scale Formation on Reverse Osmosis Membranes // *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1984. V. 17 (2). Pp. 145-151.
23. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscaling effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // *Desalination*. 2017. V. 404. Pp. 224-229.
24. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO<sub>3</sub> scaling in reverse osmosis plants // *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57. Pp. 48-49.
25. Pervov A., Andrianov A., Rudakova G., Popov K. A comparative study of some novel "green" and traditional antiscalants efficiency for the reverse osmotic Black Sea water desalination // *Desalination and Water Treatment*. 2017. V. 73. Pp. 11-21.
26. Ali S.A., Kazi I.W., Rahman F. Synthesis and evaluation of phosphate-free antiscalants to control CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O scale formation in reverse osmosis desalination plants // *Desalination*. 2015. V. 357. Pp. 36-44.
27. Pervov A.G. A simplified RO process design based on understanding of fouling mechanisms // *Desalination*. 1999. V. 126. Pp. 227-247.
28. Popov K., Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Dikareva Yu., Rudakova G. Synthesis and properties of novel fluorescent-tagged polyacrylate-based scale inhibitors // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. V. 134. P. 45017.
29. Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Ryabova A., Popov K. Insight into the Mechanisms of Scale Inhibition. A Case Study of Task-Specific Fluorescent-Tagged Scale Inhibitor Location on Gypsum Crystals // *ChemNanoMat*. 2019. V. 5, Is. 5. pp. 586-892.
30. Рудакова Г.Я., Попов К.И., Ощепков М.С., Пervov А.Г., Андрианов А.П. Новые отечественные полимерные ингибиторы солеотложений «АМЕТЕК РО-1» И «АМЕТЕК РО-2» для предотвращения отложения минеральных солей в установках обессоливания и опреснения морской воды // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2018. №2 (122), с. 60-65.
31. Schmidt C.K., Brauch H.-J. Analysis of Aminopolycarboxylates and Organophosphonates in Biogeochemistry of Chelating Agents. Ed. B.Nowack, J.M.VanBriesen. – ACS, N.Y., 2005. Pp. 76-97.
32. Shahid M.K., Choi Y-G. The comparative study for scale inhibition on surface of RO membranes in wastewater reclamation: CO<sub>2</sub> purging versus three different antiscalants // *Journal of Membrane Science*. 2018 V. 546. Pp. 61-69.
33. Li C. et al. Membrane fouling mitigation by coupling applied electric field in membrane system: Configuration, mechanism and performance // *Electrochimica Acta*. 2018. V. 287. Pp. 124-134.
34. Shahid M.K., Pyo M., Choi Y-G. The operation of reverse osmosis system with CO<sub>2</sub> as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology // *Desalination*. 2018. V. 426. Pp. 11-20.
35. Popov K., Rudakova G., Larchenko V., Tusheva M., Afanas'eva, S. Kombarova E., Kamagurov S., Kovaleva N. A comparative performance ranking of some phosphonates and environmentally friendly polymers on CaCO<sub>3</sub> scaling inhibition by NACE protocol // *Desalination and Water Treatment*. 2017. V. 69. Pp. 163-172.
36. Demadis K.D., Neofotistou E., Mavredaki E., Tsiknakis M., Sarigiannidou E.-M., Katarachia S.D. Inorganic foulants in membrane systems: chemical control strategies and the contribution of green chemistry // *Desalination*. 2005. V. 179. Pp. 281-295

#### Radical reduction of water treatment plant effluents

Spitsov D.V., Shirikova T.N., Pervov A.G.,  
Moscow Architectural Institute (State Academy)

A new approach is described to remove iron and hardness from ground water using membrane techniques. For the cases when water intake territory does not provide opportunities for wastewater discharge a new technique is proposed to utilize concentrate of reverse osmosis facilities that consists of its double stage treatment and calcium carbonate precipitation on the "seed" crystals in sedimentation reactor that provides reduction of effluents by the value of less than 0.5 % of the feed water flow. Water treatment plant's effluents are removed by sewage truck. Experimental results are presented that enables us to determine technical characteristics of membrane facilities, such as: calcium carbonate scaling rates as a function of recovery and chemical consumption. Values of annual operational costs as well as amounts of wastewater effluents are presented for the ground water treatment plant producing 1700 cubic meter of quality drinking water per day. Experimental relationships of calcium carbonate scaling rates versus recoveries demonstrate that the new techniques substantially less value than conventionally used reverse osmosis techniques. When membrane water treatment plant is designed, preference should be given to nanofiltration membrane use that ensures not only low energy consumption but reduced chemical costs as well.

Key words: ground water; water softening; water treatment plant effluents; reverse osmosis; nanofiltration; concentrate flow reduction; membrane fouling and scaling; sparingly soluble salts deposition; calcium carbonate; "seeding" techniques; scale inhibitors, antiscalants, scaling rates.