

# ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАНОФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ВОДЫ ПИТЬЕВОГО КАЧЕСТВА

*А.Г. Первов, Р.В. Ефремов, А.П. Андрианов<sup>\*)</sup>, Р.И. Макаров<sup>\*\*)</sup>*

<sup>\*)</sup> МГСУ

<sup>\*\*)</sup> РХТУ им. Д.И. Менделеева

В работе представлены экспериментальные методики, позволяющие определить значения селективностей нанофильтрационных мембран типа ОПМН-К («Владипор») по различным компонентам в зависимости от ионного состава исходной воды. Обработка экспериментально полученных кривых методом интерполяции позволяет определить значения концентраций различных ионов в фильтрате нанофильтрационных аппаратов при обработке вод с различным содержанием ионов Na, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>. В процессе эксплуатации нанофильтрационных аппаратов происходит образование на мембранах различных осадков (карбоната кальция, коллоидного железа и т.д.), что вызывает снижение селективности мембран и «проскок» в фильтрат различных загрязнений (например, фторидов). Предлагаемая методика экспериментального получения данных позволяет прогнозировать изменение состава фильтрата с течением времени в зависимости от состава исходной воды. Описана методика определения «оптимального» режима работы установок при обработке воды различного состава (водопроводной, артезианской воды). Оптимальное значение величины выхода фильтрата соответствует минимальным эксплуатационным затратам (расхода реагентов, моющих растворов, электроэнергии) при получении воды заданного состава с показателями, не превышающими уровней, заданных СанПиН.

*Ключевые слова:* нанофильтрация, оптимальный режим эксплуатации, селективность, прогнозирование.

The article presents experimental tools to determine rejection values of nanofiltration membranes OPMN-K for different ionic species depending on ionic composition of feed water. Processing of experimentally obtained curves using interpolation techniques enables us to calculate concentration of different ions in product water after treatment of feedwater, containing different amounts of ions Na, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>. During operation of nanofiltration units fouling occurs on membrane surface that reduce membrane rejection and results in penetration of different undesirable species (like fluoride, iron etc.) in product. The proposed method of experimental data treatment enables us to predict changes of product water composition with time depending on feed water chemical composition. Also the article offers a method of “optimization” of operational conditions when different feed water is treated. Optimum recovery value corresponds to minimum operational costs (antiscalant, cleaning, electricity) when quality drinking water is produced, with concentrations of different ionic not exceeding WHO required level.

*Keywords:* nanofiltration, optimum operational conditions, rejection, prognosis.

## Введение

Питьевое водоснабжение в наше время становится крупным потребителем мембранных технологий. Огромные масштабы приобретает использование мини-систем улучшения качества водопроводной воды, устанавливаемых в квартирах, загородных домах, столовых, ресторанах, поликлиниках и т. д.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению селективностей мембран микроэлементам, таким как железо, фториды, стронций и барий. Уровень концентрации этих веществ в воде определяет ее пригодность для питья.

При использовании современных композитных нанофильтрационных мембран с заряженной поверхностью, качество очистки воды (селективность) в огромной степени зависит от состава воды, в частности, от соотношения концентраций двухвалентных и одновалентных ионов [1]. Поэтому особый интерес представляет умение прогнозировать макрокомпонентный состав очищенной воды и «проскок» в фильтрат микрокомпонентов.

В предыдущих работах [2-4] описывалась методика прогнозирования шестикомпонентного состава очищенной воды.

Аналогичным образом были проведены эксперименты по определению селективностей мембран по ионам Fe<sup>2+</sup> и F<sup>-</sup>.

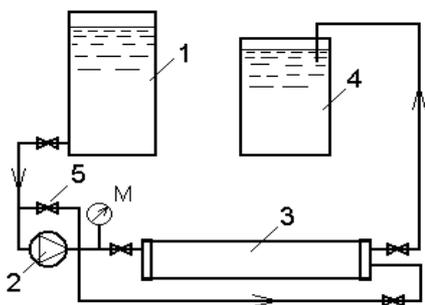
**(а)1. Методика определения селективностей мембран в зависимости от ионного состава исходной воды.**

Эксперименты по изучению селективных свойств наночисточных мембран проводились на лабораторной установке, показанной на рис. 1.

Исходная вода помещается в бак 1, откуда насосом 2 подается в мембранный наночисточный аппарат 3. Фильтрат направляется в бак 4, а концентрат возвращается в бак 1. Рабочее давление устанавливается краном 5.

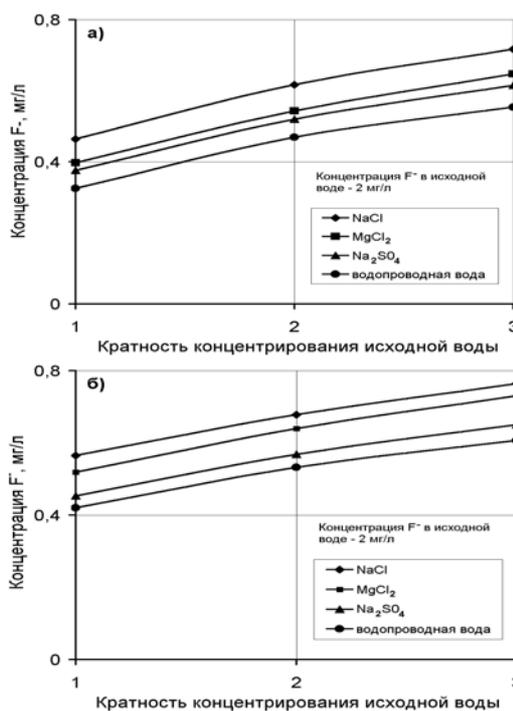
В зависимости от количества воды в баке 4 устанавливается величина выхода фильтрата (соотношение между расходом фильтрата и концентрата), или кратность объемного концентрирования. Чем больше величина выхода фильтрата, тем больше значение концентрации солей в фильтрате. Данная методика моделирует работу наночисточной установки и позволяет определить параметры очищенной воды в зависимости от заданной величины выхода фильтрата. Определение селективностей мембран по ионам  $F^-$  и  $Fe^{2+}$  определяли в широком диапазоне концентраций ионов  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ .

Эксперименты проводили на воде московского водопровода с добавлением растворов  $FeSO_4$  и  $NaF$ , концентрации ионов  $Fe^{2+}$  и  $Na^+$  составляли 2 и 5 мг/л. Для моделирования состава подземной воды в водопроводную воду добавляли растворы солей  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaHCO_3$  в концентрациях 5 и 10 мг-экв/л.

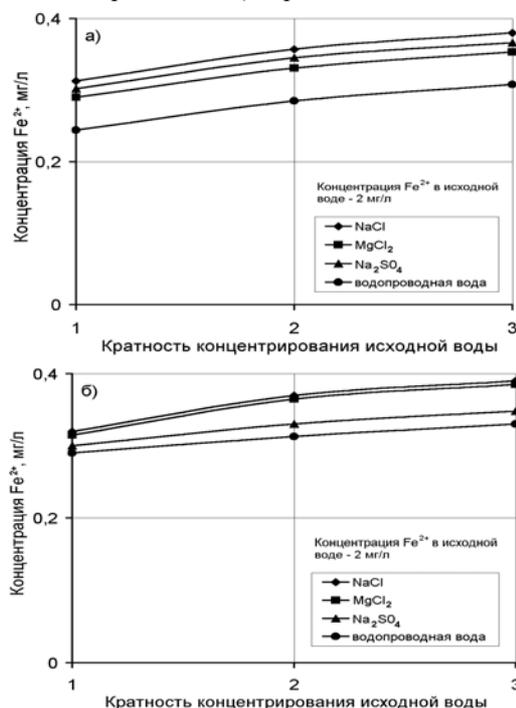


**Рис. 1.** Схема лабораторной мембранной установки:

- 1 – бак исходной воды,
- 2 – насос,
- 3 – наночисточный аппарат,
- 4 – бак сбора фильтрата,
- 5 – вентиль регулировки давления.



**Рис. 2.** Зависимости концентраций ионов  $F^-$  в фильтрате от кратности концентрирования исходной воды в наночисточном аппарате: а) в начале работы и б) через 300 часов



**Рис. 3.** Зависимости концентраций ионов  $Fe^{2+}$  в фильтрате от кратности концентрирования исходной воды в наночисточном аппарате: а) в начале работы и б) через 300 часов.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости концентраций ионов  $Fe^{2+}$  и  $F^-$  в фильтрате от кратности объемного концентрирования исходной воды в аппарате для значений концентраций ионов  $Fe^{2+}$  и  $F^-$  в исходной воде 2 и 5 мг/л.

Как видно из рисунков, при увеличении концентраций одновалентных ионов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) селективность по ионам  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{F}^-$  падает.

При увеличении концентрации двухвалентных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), селективность по  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{F}^-$  увеличивается (благодаря тому, что крупные двухвалентные ионы «труднее» проходят в фильтрат). При этом, в случае использования растворов  $\text{CaCl}_2$  селективность оказывается ниже, чем в случае использования раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Это вызвано тем, что мембраны имеют отрицательный заряд и «пропускают» положительно заряженные ионы (ионы жесткости) в большей степени, чем отрицательно заряженные ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Для того чтобы прогнозировать состав очищенной воды и содержание в ней ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{F}^-$ , разработана методика, использующая метод интерполяции [3]. Как уже описывалось в работе [3], методика состоит в распределении результатов экспериментов по трем группам (рис. 4) – в зависимости от усложнения химического состава исходной воды.

Как показано на рис. 5 (на примере  $\text{F}^-$ ), в первую группу экспериментов входят эксперименты с солями  $\text{NaCl}$  и  $\text{MgCl}_2$  (рис. 5а). В зависимости от соотношений значений концентраций ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  изменяются концентрации ионов  $\text{F}^-$  в фильтрате. Для требуемых значений концентраций ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$  в исходной воде, кривая зависимости концентрации  $\text{F}^-$  в фильтрате от кратности концентрирования лежит между кривыми 1<sup>а</sup> и 2<sup>а</sup> или 1<sup>а</sup> и 3<sup>а</sup> (рис. 5а). В случае наличия в воде сульфат-ионов, селективность по фторид-ионам будет увеличиваться. На рис. 5б и 5в показаны кривые, полученные на растворах  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgCl}_2$ .

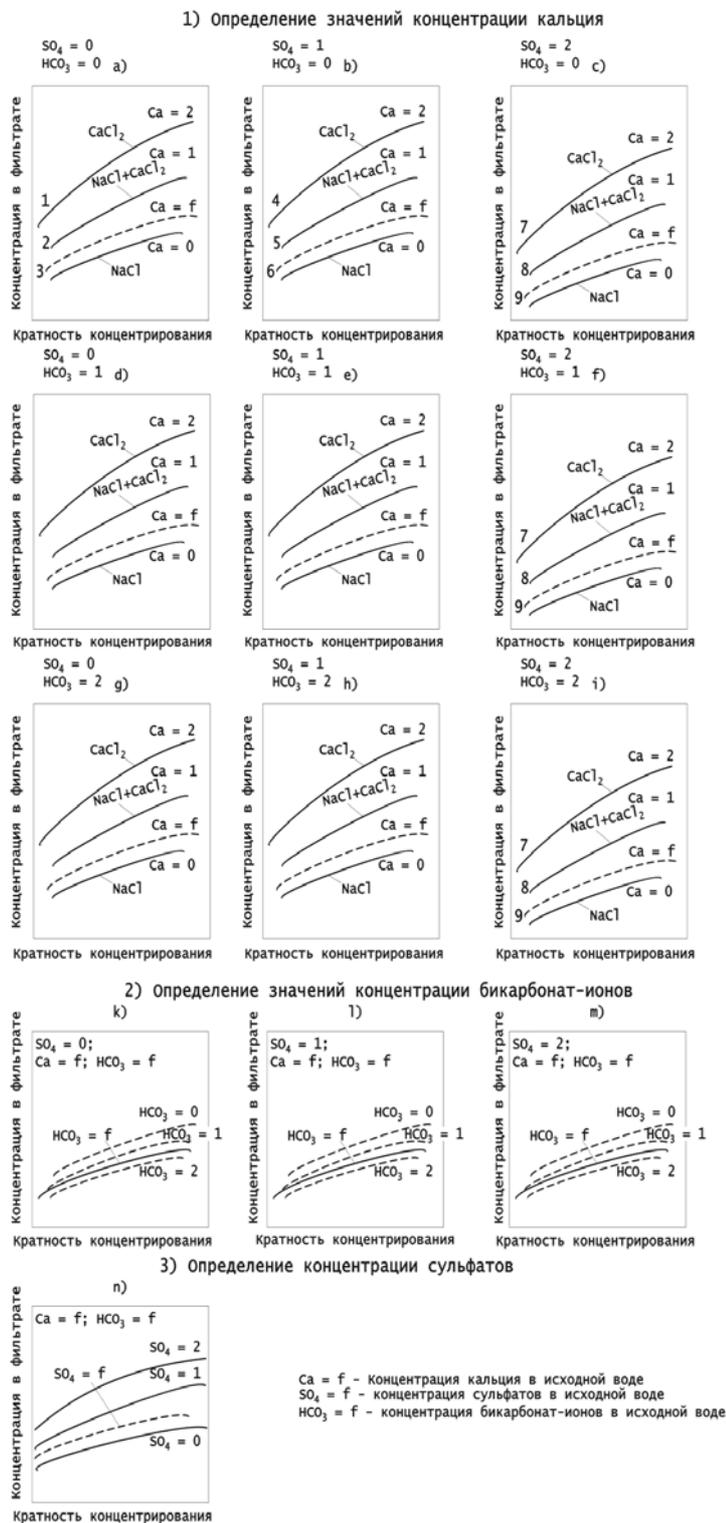
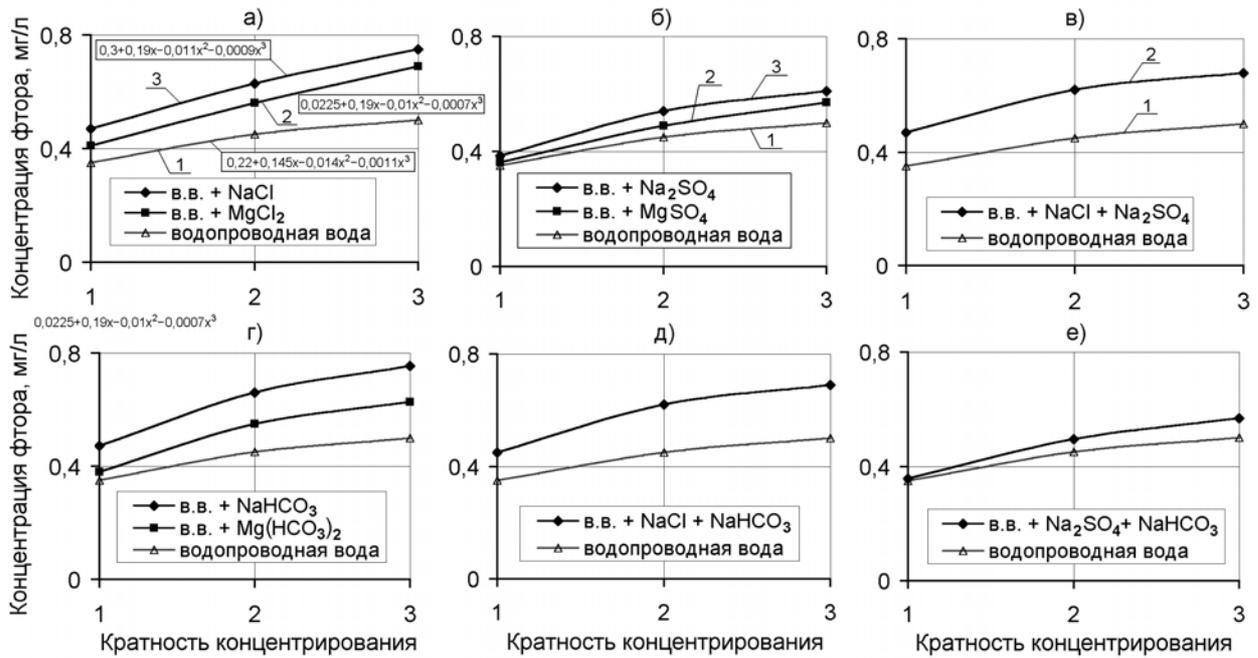


Рис. 4. Методика прогнозирования химического состава фильтрата при нанофильтрации

Для различных концентраций ионов  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$  искомая зависимость лежит между кривыми 1<sup>б</sup> и 2<sup>б</sup>, 1<sup>б</sup> и 3<sup>б</sup> или 1<sup>в</sup> и 2<sup>в</sup>.

В случае изменения щелочности воды (концентрации ионов  $\text{HCO}_3^-$ ) изменение селективно-



**Рис. 5.** Содержание ионов F<sup>-</sup> в фильтрате в зависимости от кратности концентрирования исходных растворов различного состава в нанофильтрационном аппарате.

сти по ионам F<sup>-</sup> фиксируется аналогично с помощью интерполяции кривых на рис. 5г – 5е.

Как уже говорилось выше, данный подход описан в работах [2 - 4] для определения значений концентраций ионов Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> в фильтрате. Полученные данные позволяют расширить прогноз по ионам F<sup>-</sup> и Fe<sup>2+</sup>.

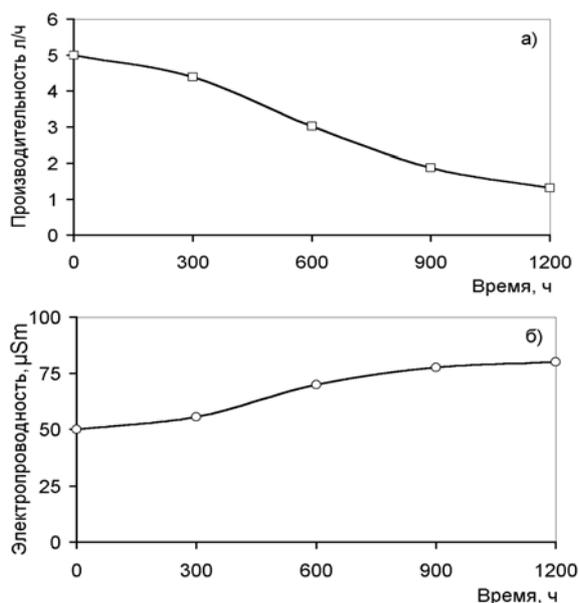
Для обработки полученных данных методом интерполяции полученные кривые представляются в виде полиномов (рис. 5а). Для нахождения кривой, соответствующей концентрации Mg<sup>2+</sup>, лежащей в диапазоне между значениями 2 и 5 (кривые 1<sup>а</sup> и 2<sup>а</sup> на рис. 5а), коэффициенты в формулах изменяются пропорционально соотношениям значения концентраций кальция.

Как уже говорилось выше, эксперименты проводились для значения концентраций ионов F<sup>-</sup> 2 и 5 мг/л. Для получения других значений концентраций можно с минимальной степенью ошибки пропорционально изменять все полученные значения концентраций F<sup>-</sup> в фильтрате.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов получены зависимости, позволяющие с достаточно большой степенью точности определить ионный состав очищенной воды, включая основные 6 компонентов, а также микрокомпоненты, такие, как ионы F<sup>-</sup> и Fe<sup>2+</sup>.

Однако, как известно, ионный состав фильтрата в процессе работы мембранных установок может постоянно меняться. Это вызвано образованием на мембранах осадков и снижение вследствие этого селективности мембран. Представляет большой интерес не только определить для разных составов исходной воды количественный состав фильтрата, но и спрогнозировать снижение селективности мембран с течением времени, в частности, дать прогноз и определить время «проскока» в фильтрат ионов F<sup>-</sup> и Fe<sup>2+</sup> (при обработке подземной воды), а также ряда других веществ (органических соединений, нитратов и т. д.)

При обработке природных вод основным и наиболее «опасным» видом осадка является карбонат кальция [5]. В работах [2 - 5] были представлены методики прогнозирования падения производительности и селективности обратноосмотических мембран. Однако, как было ранее показано [5], на скорость образования осадка карбоната кальция в большей степени влияет величина селективности мембран по осадкообразующим ионам. При обработке природных вод с помощью нанофильтрационных мембран, процессы накопления осадка и снижение селективности могут происходить с закономерностями, отличающимися от тех, которые наблюдаются при обратном осмосе.



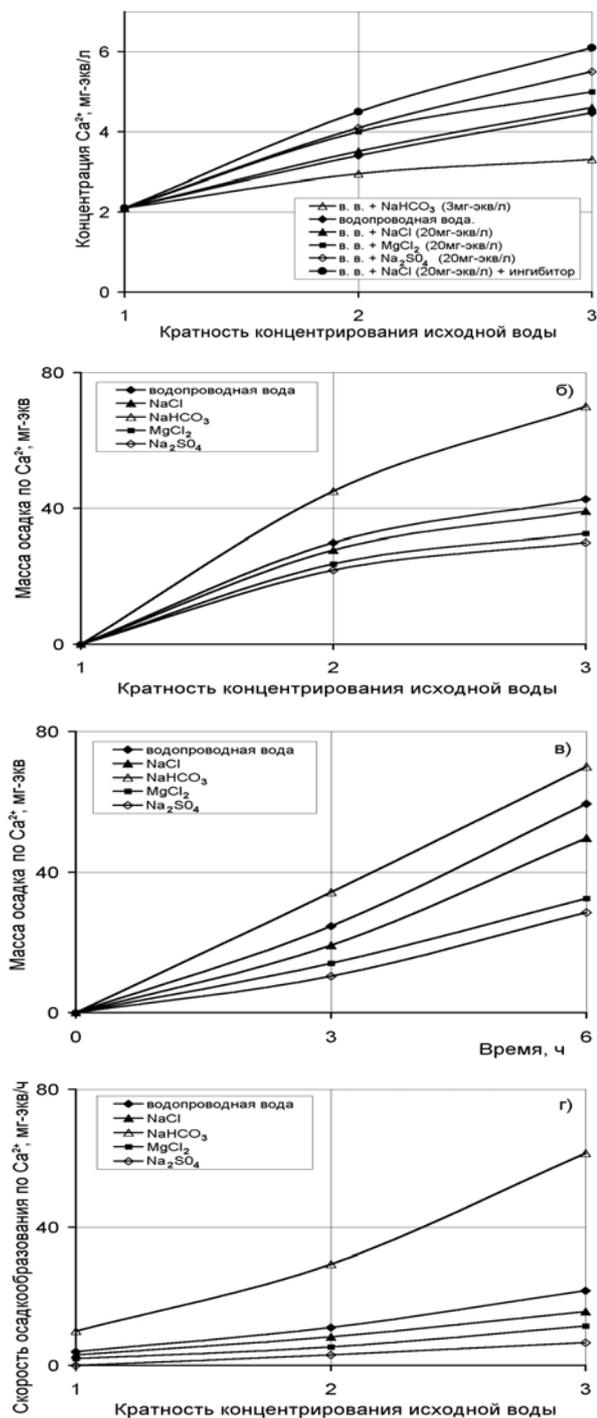
**Рис. 6.** Результаты ресурсных испытаний нанофильтрационного аппарата на воде московского водопровода: а) снижение производительности со временем; б) увеличение электропроводности фильтрата.

Для оценки влияния осадка карбоната кальция на работу нанофильтрационных мембран использовалась методика, описанная в [5]. Одновременно с проведением экспериментов по определению селективностей нанофильтрационных мембран, проводились ресурсные испытания нанофильтрационного элемента на воде московского водопровода. Результаты этих испытаний, проводившихся в течение 1000 часов, представлены на рис. 6.

На рис. 6а показано снижение производительности фильтрата, а на рис. 6б – увеличение электропроводности фильтрата. Для прогноза количества накапливаемого осадка в продолжение эксперимента определялись скорости образования карбоната кальция: в начале испытаний, через 300 часов непрерывной работы, через 600 часов и через 900 часов. Для этого мембранный аппарат устанавливался на испытательный стенд, показанный на рис. 1.

Сущность методики экспериментального определения скоростей осадкообразования описана в [5]. Исходная вода помещается в бак 1, фильтрат сбрасывается в бак 3, а концентрат направляется в бак 1. В процессе концентрирования исходной воды отбираются пробы концентрата. Если на мембранах имеет место осадкообразование (отложение карбоната кальция),

то кратность концентрирования по ионам кальция будет отличаться от кратности концентрирования по ионам магния (не выпадающим в осадок). Количество образовавшегося осадка в

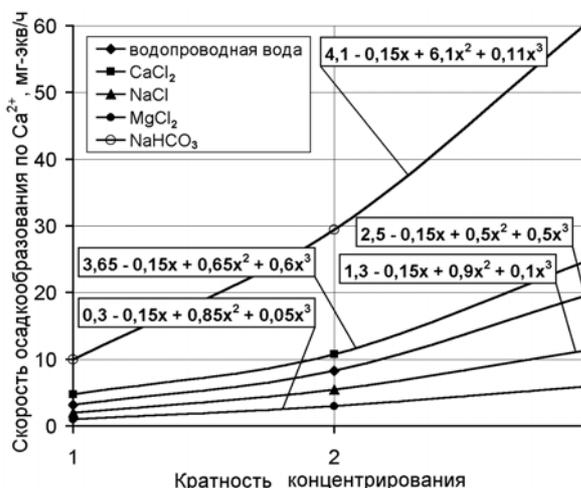


**Рис. 7.** Стадии определения скоростей осадкообразования на мембранах ОПМН-К при различных составах исходной воды: а) концентрация кальция в циркуляционном растворе; б) масса осадка, накопленного на мембране, в зависимости от кратности концентрирования и в) от времени; г) скорость роста осадка в зависимости от кратности концентрирования

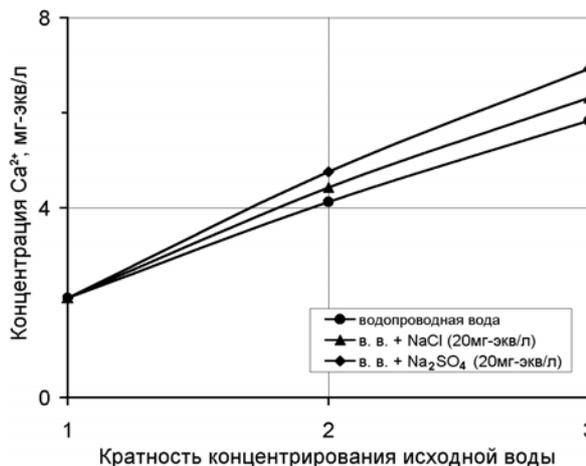
мг-экв можно определить, как разницу между количеством кальция в исходной воде и количеством кальция в фильтрате и концентрате (в баках 1 и 3). На рис. 7 показаны стадии определения скоростей осадкообразования (на примере воды московского водопровода): зависимость концентраций кальция в баках концентрата от кратности объемного концентрирования (а), зависимость количества осадка карбоната кальция от кратности концентрирования (б); зависимость количества осадка карбоната кальция от времени эксперимента (в); зависимость скорости образования осадка от кратности концентрирования (г). Скорость образования осадка определяется как тангенс угла наклона касательной к кривой на графике рис. 7г [5].

Результаты определения скоростей осадкообразования при обработке растворов, ранее исследованных на предмет определения селективности (рис. 2 и 3), показаны на рис. 8. Для растворов с различным ионным составом построены зависимости скоростей осадкообразования от кратности концентрирования. Как видно из рисунка, скорость осадкообразования тем выше, чем выше значение селективности мембран: при разделении растворов, содержащих двухвалентные ионы, селективность мембран выше, как показывают предыдущие эксперименты.

Для предотвращения образования осадка карбоната кальция используют дозирование ингибитора в исходную воду. Результаты определения скоростей образования осадка в присутствии ингибитора представлены на рис. 9.



**Рис. 8.** Пример определения зависимостей скоростей осадкообразования от кратности концентрирования в виде полиномов.



**Рис. 9.** Результаты определения скоростей роста осадка в присутствии ингибитора.

Для определения скоростей осадкообразования в зависимости от ионного состава воды применяется метод интерполяции, аналогично описанному выше методу прогноза значений концентраций. Результаты определения скоростей осадкообразования разбиваются на 3 группы. В зависимости от содержания  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$  определяются скорости осадкообразования.

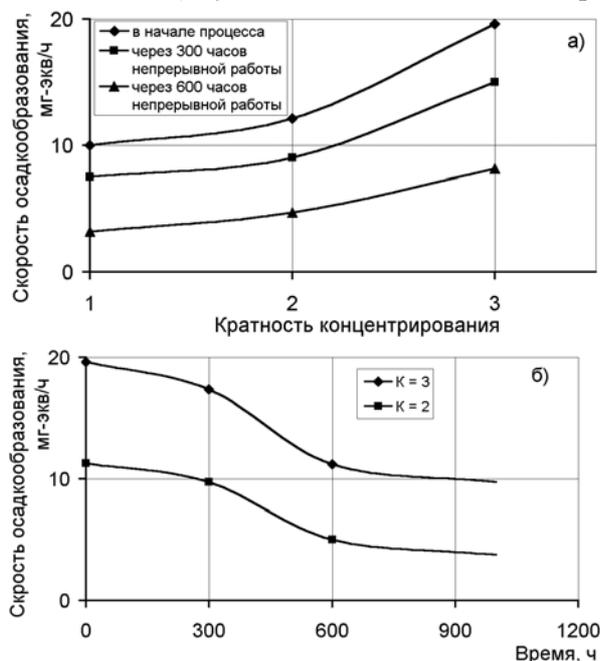
В первую группу входят эксперименты с растворами  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ , которые добавляют в водопроводную воду (рис. 8). Здесь увеличение общего солесодержания идет за счет увеличения концентрации  $\text{NaCl}$ . Затем рассмотрены случаи, когда увеличение солесодержания происходит за счет увеличения концентрации ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . Скорость осадкообразования резко возрастает, если в воде присутствуют ионы  $\text{HCO}_3^-$ . Следующие этапы заключаются в постепенном введении в исходную воду одновременно двух, трех и более компонентов – до тех пор, пока в воде не будут присутствовать все соли:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{NaHCO}_3$ . Обработка результатов методом интерполяции проведена аналогично описанному выше (рис. 5) и в ранее опубликованных работах [2 - 4]. Создание компьютерной программы прогноза связано единым алгоритмом прогнозирования, так как определение значения скоростей осадкообразования для различного ионного состава исходной воды позволяет предсказать как изменение качества очищенной воды с течением времени, так и рассчитать количество накопленного в мембранном аппарате осадка.

## 2. Методика прогнозирования скоростей осадкообразования

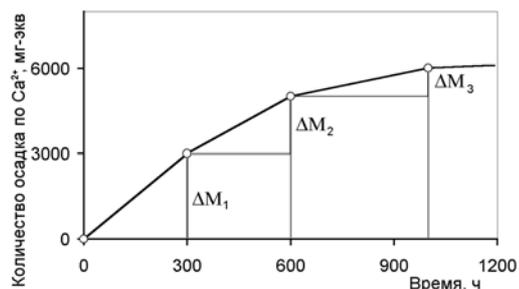
В процессе ресурсных испытаний мембранных элементов на воде московского водопровода, через определенные промежутки времени (через 300, 600 и 900 часов непрерывной работы), определялись скорости образования осадка карбоната кальция в этих элементах, в соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе.

На рис. 10а показаны зависимости скорости роста осадка от кратности концентрирования на разных стадиях накопления осадка. На рис. 10б показаны снижение скоростей образования осадка с течением времени, по мере накопления осадка. Количество накопленного осадка может быть определено методом интегрирования зависимости, показанной на рис. 10б.

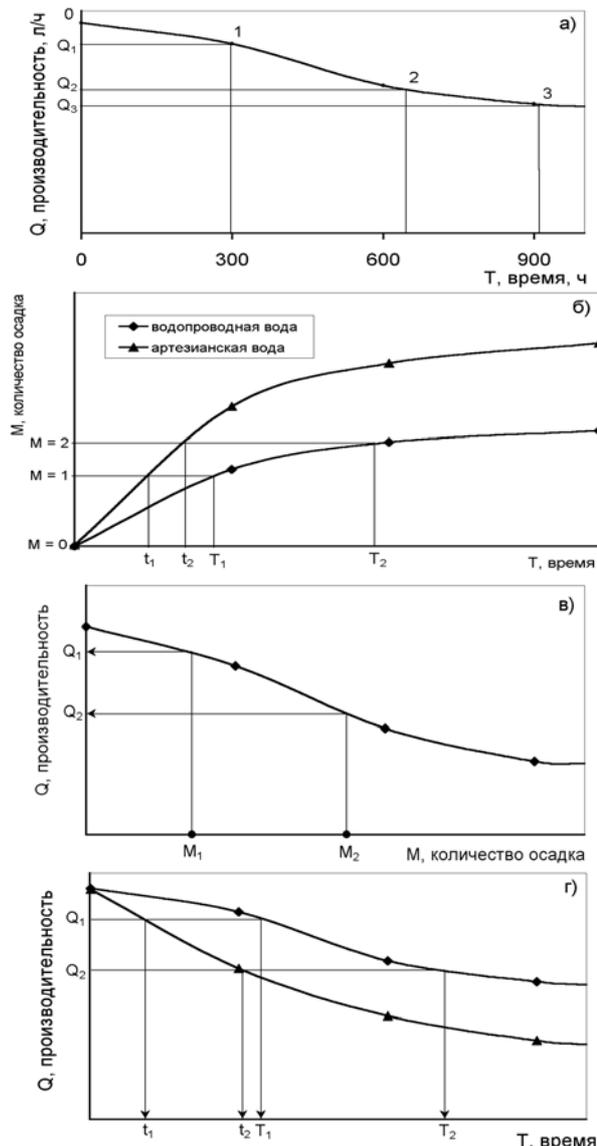
Если скорость осадкообразования была постоянна, то количество осадка, образовавшегося за этот период, может определено, как произведение скорости осадкообразования на время. На рис. 11 показана зависимость количества осадка от времени в виде ломанной кривой. Таким образом, для каждого случая (для разных составов исходной воды) будет иметь место сходная кар-



**Рис. 10.** Изменение скоростей накопления осадка в процессе ресурсных испытаний нанофильтрационного аппарата: а) результаты определения скоростей осадкообразования на разных стадиях работы мембранного аппарата; б) снижение скорости накопления осадка со временем



**Рис. 11.** Прогнозирование количества осадка от времени (для случая работы на водопроводной воде при  $K = 2$ ).



**Рис. 12.** Прогнозирование снижения производительности нанофильтрационных мембран: а) изменение производительности и скоростей осадкообразования с течением времени (экспериментальные данные); б) построение зависимости количества накопленного осадка от времени; в) соответствие производительности и количества накопленного осадка; г) зависимость производительности от времени.

тина зависимости накапливаемого количества осадка от времени: с течением времени скорость осадкообразования будет падать. Каждому значению количества осадка на графике рис. 11 соответствует определенное значение производительности и селективности мембранного аппарата (рис. 6). Таким образом, определяя для разных составов воды скорости осадкообразования и показатели работы мембраны (селективность и производительность) на разных стадиях осадкообразования, мы получим данные для прогнозирования качества очищенной воды с течением времени.

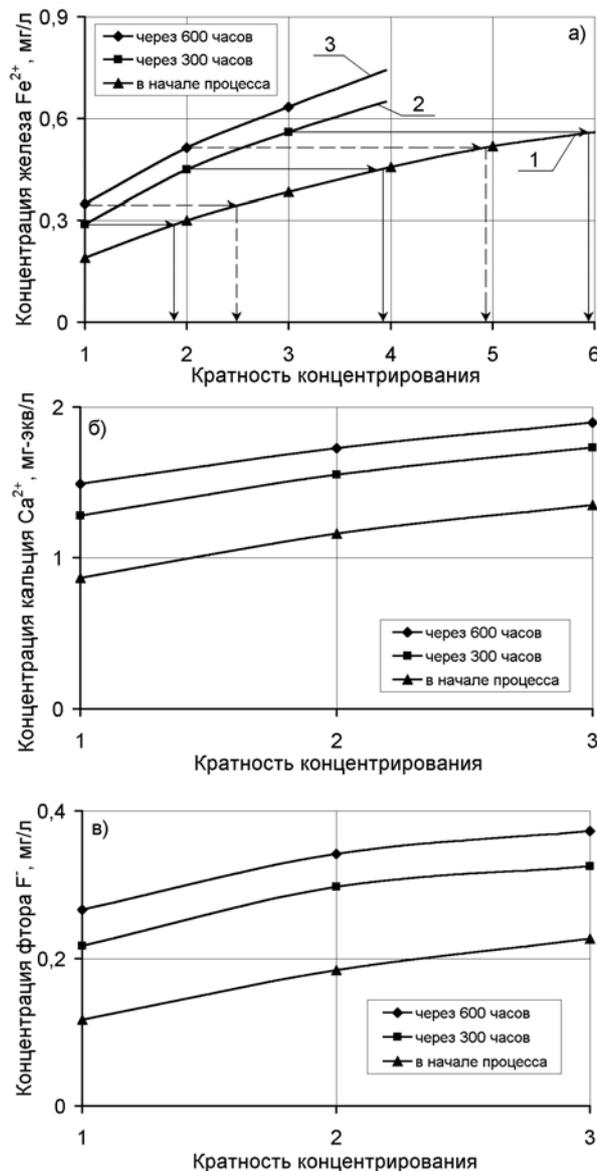
Пример прогноза снижения производительности на основе результатов ресурсных испытаний (рис. 6) показан на рис. 12. На рис. 12а показано снижение производительности от времени. На рис. 12б представлены кривые роста количества накопленного осадка с течением времени, полученные методом интегрирования (рис. 10 и 11) для разных скоростей осадкообразования. Каждому значению производительности аппарата соответствует количество накопленного осадка (рис. 12б) и соответственно, время, требуемое для накопления осадка (рис. 12г). Аналогично проводится прогноз снижения селективности мембран.

В наших экспериментах определение скоростей осадкообразования и показателей качества очищенной воды для разных составов исходной воды происходило одновременно в течение ресурсных испытаний через 300, 600 и 900 часов. На рис. 13 показаны полученные зависимости концентраций  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$  от кратности концентрирования на разных стадиях осадкообразования.

### 3. Оценка влияния осадка на качество фильтрата

Ухудшение качества очищенной воды связано с развитием концентрационной поляризации в слое образовавшегося осадка вследствие затруднения диффузии растворенных солей [5].

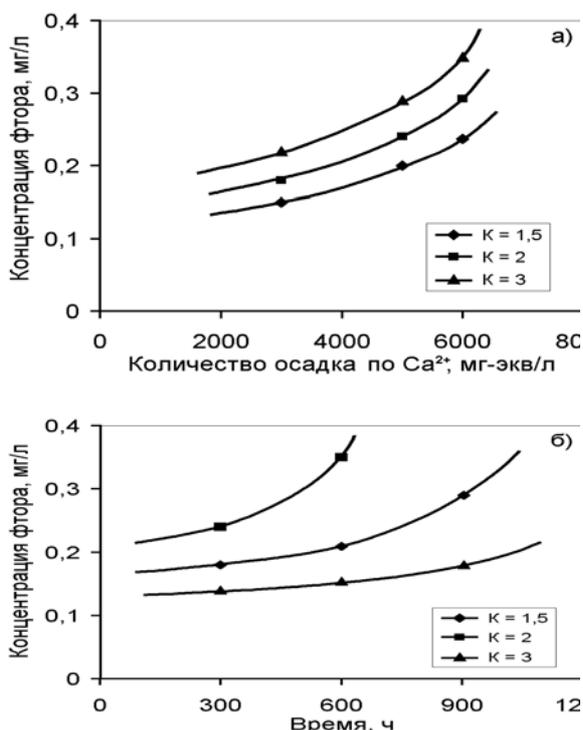
Как видно на рис. 13а, наличие осадка соответствует развитию концентрационной поляризации и увеличению концентрации различных компонентов в фильтрате. Развитие концентрационной поляризации равносильно увеличению кратности концентрирования в аппарате (уменьшению величины выхода фильтрата).



**Рис. 13.** Изменение селективности мембран по различным ионам на разных стадиях осадкообразования.

На рис. 14 показаны зависимости концентрации различных ионов от кратности концентрирования, полученные на разных стадиях образования осадка в рулонном элементе (при количествах осадка 3000, 4800 и 6000 мг-экв).

Полученные данные, которые представлены на рис. 14, обработаны в виде зависимости концентрации ионов  $\text{F}^-$  в фильтрате от количества осадка при разных значениях выбранной величины кратности концентрирования. Чем выше кратность концентрирования исходной воды в аппарате, тем интенсивнее идет процесс осадкообразования, и тем быстрее «падает» селективность мембран.



**Рис. 14.** Пример прогноза увеличения концентраций ионов F<sup>-</sup> в фильтрате при разных кратностях концентрирования:  
 а) в зависимости от массы осадка и  
 б) с течением времени.

Значения концентраций ионов в фильтрате при разных кратностях концентрирования, соответствующие «возрасту» осадка 300 или 600 часов, могут быть получены из зависимости, описывающей селективность мембран в начале процесса.

Так, на рис. 13а видно, что значения концентраций железа в фильтрате на кривой 2, соответствующие кратностям концентрирования 1 и 2, приблизительно равны значениям концентрации железа в фильтрате на кривой 1 при кратностях концентрирования соответственно 2 и 4; а значения концентраций железа на кривой 3, соответствующие тем же кратностям концентрирования 1 и 2, равны значениям концентраций железа на кривой 1, соответствующие значениям кратности концентрирования 2,5 и 5.

Таким образом, зная зависимость концентраций иона от кратности концентрирования в начале процесса, мы можем получить кривые зависимостей концентраций от кратности концентрирования на разных стадиях осадкообразования.

Для этого нужно определить, какому значению кратности концентрирования  $K_1$  на кривой, описывающей начало процесса (кривая 1 на

рис. 13а), соответствует значение концентрации иона при кратности концентрирования равной единице на кривой 2, описывающей селективность «заросшего» осадком аппарата. Тогда значения концентраций, соответствующих кратности концентрирования 1, 2 и 3 на кривой 2, будут соответствовать значениям концентраций на кривой, описывающей начало процесса, при кратностях концентрирования, увеличенных в  $K_1$  раз (рис. 13а).

Используя разработанную методику, могут быть получены кривые, описывающие зависимость концентраций заданных ионов на различных стадиях образования осадка. Следовательно, может быть сделан прогноз изменения состава фильтрата в процессе образования осадка для различных случаев состава исходной воды.

Пользуясь полученными данными, можно прогнозировать изменение состава фильтрата с течением времени в зависимости от состава исходной воды и выбранной величины выхода фильтрата (кратности концентрирования).

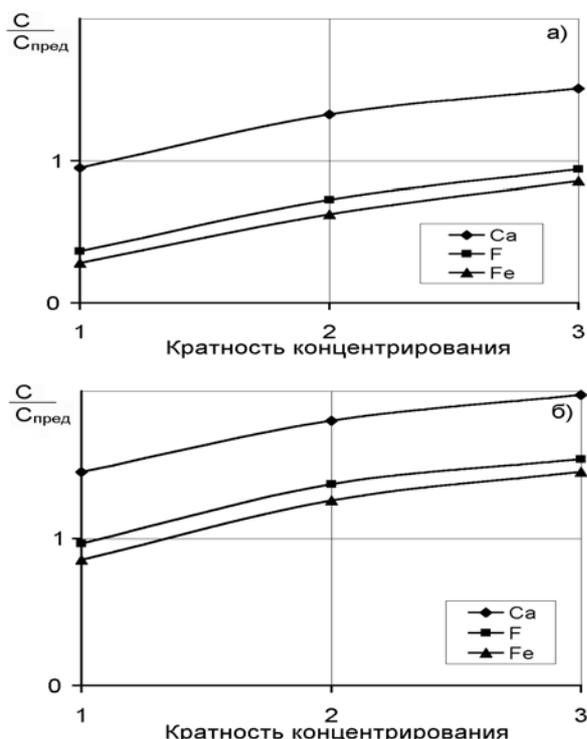
Методика прогноза состоит в следующих операциях:

1. Для каждого состава исходной воды нужно определить интенсивность осадкообразования (получить зависимость скорости осадкообразования от кратности концентрирования по рис. 8).
2. Для заданных условий эксплуатации (выбранные кратности концентрирования и соответствующей ей скорости осадкообразования) получить зависимость количества осадка от времени работы установки (рис. 11).
3. На основании полученных зависимостей концентраций различных ионов в фильтрате от кратности концентрирования, построить зависимость концентраций этих ионов от количества накопленного осадка для выбранного значения кратности концентрирования.
4. Поскольку каждому значению количества осадка соответствует значение времени работы установки на графике рис. 11, то изменение концентраций различных ионов в фильтрате можно представить в виде зависимости от времени работы установки. На рис. 14б показаны примеры прогноза изменения концентрации иона F<sup>-</sup> в фильтрате при обработке воды московского водопровода при различных значениях кратности концентрирования.

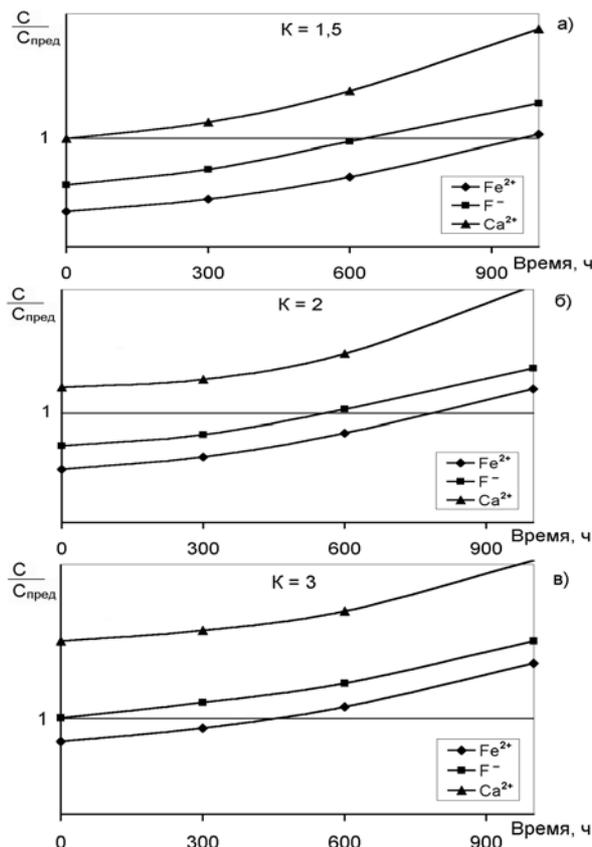
#### 4. Оптимизация работы нанофильтрационных установок

«Оптимальным» может быть признан такой режим эксплуатации, при котором «проскок» в фильтрат нежелательных загрязнений (например, фтора или железа) вследствие осадкообразования может произойти в течение наиболее длительного периода. Чем больше выбрана кратность концентрирования, тем быстрее наступает «проскок». На рис. 15 показаны расчетные кривые «проскока» иона  $F^-$  в зависимости от кратности концентрирования (для значений  $K = 1,5; 2; 3$ ) на примере воды московского водопровода. Вместо значений концентраций иона  $F^-$ , даны значения «относительных» концентраций, то есть отношения абсолютных концентраций ионов  $F^-$  и  $Fe^{2+}$  в растворе к предельному значению концентрации, установленному СанПиНом.

Как видно из рис. 15, чем выше выбранные значения кратности концентрирования (выхода фильтрата), тем раньше наступает превышение относительной концентрации различных веществ.



**Рис. 15.** Зависимости значений относительных концентраций  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $F^-$  от кратности концентрирования на разных стадиях осадкообразования (на примере водопроводной воды): а) в начале процесса; б) через 600 часов непрерывной работы.

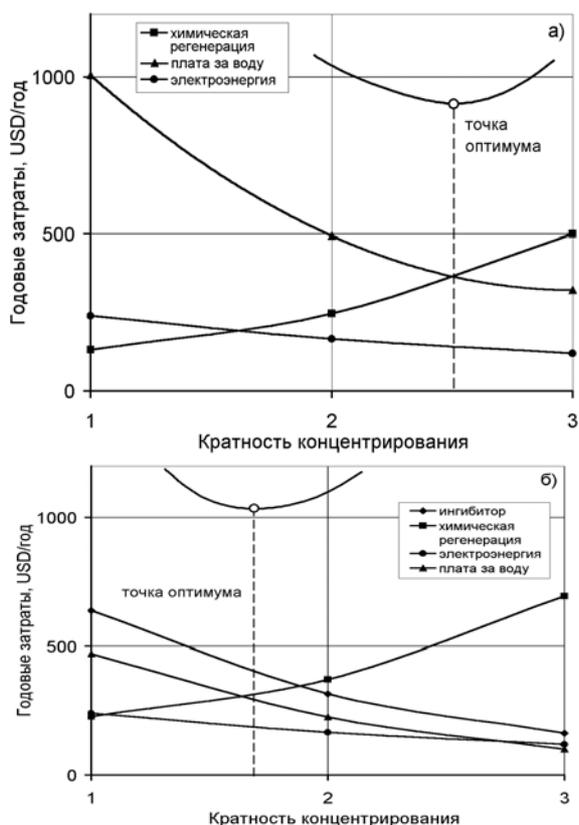


**Рис. 16.** Прогнозирование «проскока» иона  $F^-$  в зависимости от кратности концентрирования (на примере воды московского водопровода):  $C/C_{пред}$  – величина относительной концентрации.

Такой анализ целесообразно сделать для прогноза «проскока» различных загрязнений, например, железа и жесткости.

На рис. 16 показаны зависимости роста относительных концентраций ионов  $F^-$ ,  $Fe^{2+}$  и  $Ca^{2+}$  с течением времени для воды московского водопровода при разных величинах выхода фильтрата.

Выбор времени «проскока» является определяющим для назначения сервисных мероприятий. Именно из-за опасности «проскока» нежелательных загрязнений химическая регенерация мембран назначается по результатам прогноза. Химические промывки являются одной из составляющих затрат на эксплуатацию установки, и зависят для данного качества исходной воды от выбранной кратности концентрирования. Вместе с тем, на объектах водоснабжения огромное значение имеют и другие составляющие, также зависящие от кратности концентрирования воды в мембранных аппаратах – стоимость исходной воды, стоимость сброса в канализацию и т. д. В зависимости от



**Рис. 17.** Примеры оптимизации эксплуатационных затрат при эксплуатации нанофильтрационной установки:  
 а) городской водопровод;  
 б) артезианская вода.

расположения объекта (город или загородный поселок) меняются эти стоимости. Поэтому задачей оптимизации является выбор такой кратности концентрирования, при которой затраты будут наименьшими.

На рис. 17 показаны примеры оптимизационных расчетов по определению оптимальной кратности концентрирования в нанофильтрационных установках, используемых для доочистки городской водопроводной воды (рис. 17а) и артезианской воды (рис. 17б) для установки производительностью 1000 л/час.

При обработке городской воды наибольшей составляющей эксплуатационных затрат является стоимость водопроводной воды, значительно превышающая стоимость сервисных реагентов (ингибитора и моющих растворов), поэтому здесь оптимально проводить процесс при достаточно больших кратностях концентрирования.

При обработке артезианских воды расход сервисных реагентов является более существенной составляющей, поэтому значение оптимальной кратности концентрирования соответствует максимальному значению периода эксплуатации до «проскока» в фильтрат ионов железа или фторид-ионов.

### Выводы

1. Селективность нанофильтрационных мембран в очень большой степени определяется ионным составом воды.
2. Скорости образования осадка карбоната кальция в аппаратах с нанофильтрационными мембранами также зависят от ионного состава воды.
3. Вследствие осадкообразования селективность по растворенным ионам меняется, что необходимо учитывать при получении воды питьевого качества с рядом показателей, концентрации которых соответствуют Сан-ПиН.
4. При подборе оптимальных условий эксплуатации важно учитывать время работы установки до «проскока» загрязнений в очищенную воду.

### Литература

1. *Саббатовский К.Г.* Селективность и электрокинетические свойства мембраны ОПМН-КМЗ по отношению к водным растворам электролитов // Серия. Критические технологии. Мембраны, 2001, № 11, с. 38-44.
2. *Pervov A.G. et al.* RO and NF membrane systems for drinking water production and their maintenance techniques. // *Desalination*. 2000. V. 132, p. 315-321.
3. *Макаров Р. И., Первов А. Г., Андрианов А. П.* Прогноз качества воды, обработанной с помощью нанофильтрационных мембран ОПМН // Критические технологии. Мембраны. 2002. №15, стр. 3 – 9.
4. *Первов А.Г., Макаров Р. И., Андрианов А.П., Ефремов Р.В.* / Мембраны: новые перспективы освоения рынка питьевой воды // *Водоснабжение и сан. техника*. 2002. №10, стр. 26-29.
5. *Pervov A.G.* Scale Formation Prognosis and Cleaning Schedules in RO Systems Operation. // *Desalination*. 1991. V. 83, p. 77.