

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ УСТАНОВОК ВОДОПОДГОТОВКИ С НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫМИ МЕМБРАНАМИ

*В. Н. Ануфриев<sup>1</sup>, А. С. Шпакова<sup>2</sup>, Г. А. Волкова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Доцент, к.т.н., Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь, e-mail vladimir.anufriev@bntu.by

<sup>2</sup> Магистрант, Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь, e-mail nastja.shpakova@mail.ru

<sup>3</sup> Доцент, к.т.н., Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь, volga-brest@mail.ru

### **Аннотация**

Одним из основных преимуществ нанофильтрации, как метода умягчения воды, является то, что в процессе удаления ионов кальция и магния одновременно пропускаются мембраной гидратированные одновалентные ионы. При этом при нанофильтрации не добавляется дополнительное количество ионов натрия, как это происходит при ионном обмене. Нанофильтрация позволяет обрабатывать большие расходы воды в непрерывном режиме. Вместе с тем, существуют ограничения по применению технологии. Основным недостатком нанофильтрации, как и всех технологий мембранного разделения, является стоимость и обслуживание используемых мембран.

**Ключевые слова:** нанофильтрация, мембраны, давление, расход, мембранные модули, пермеат, концентрат.

## DESIGN AND CALCULATION OF WATER TREATMENT INSTALLATIONS WITH NANOFILTRATION MEMBRANES

*V. N. Anoufriev<sup>1</sup>, A. S. Shpakova<sup>2</sup>, G. A. Volkova<sup>3</sup>*

### **Abstract**

One of the main advantages of nanofiltration as a method of water softening is that in the process of removing calcium and magnesium ions, hydrated monovalent ions are simultaneously passed through the membrane. Moreover, during nanofiltration no additional sodium ions are added, as happens in ion exchange. Nanofiltration allows you to process large flows of water in a continuous mode. However, there are restrictions on the use of technology. The main disadvantage of nanofiltration, as with all membrane separation technologies, is the cost and maintenance of the membranes used.

**Keywords:** nanofiltration, membranes, pressure, flow, membrane module, permeate concentrate.

## **Введение.**

Процессы микрофльтрации (МФ) с размерами пор мембран – 1,50-0,15  $\mu\text{м}$ , ультрафльтрации (УФ)– 0,15-1,0  $\times 10^{-3}$   $\mu\text{м}$ , нанофльтрации (НФ)–1,0  $\times 10^{-3}$ -10,0  $\times 10^{-3}$   $\mu\text{м}$ , и обратного осмоса (ОО) являются наиболее распространенными мембранными процессами [1,2,3]. Применение установок с мембранами зависит от состава исходной воды и требований к очищенной воде.

Обработка воды нанофльтрацией основана на проникновении нескольких компонентов смеси через полупроницаемую мембрану под действием разности давления. Мембраны, применяемые для нанофльтрации, имеют размер пор от 1 до 10 нм, что меньше, чем в мембранах, используемых при микро- и ультрафльтрации.

Мембраны преимущественно изготавливают из тонких полимерных пленок, таких как ацетилцеллюлоза, полиамид, полиэтилентерефталат, фторопласты. Также применяются мембраны из керамики, металлов. Металлические мембраны изготавливают из оксида алюминия путем электрохимического окисления из металлического алюминия в кислой среде.

Определенный интерес вызывает применение нанофльтрации для умягчения технической воды. Мембраны, применяемые для нанофльтрации, задерживают примеси диаметром от 1 нм, органические вещества с молекулярной массой 200-400, 90-99% солей двухвалентных металлов, 80-90% сульфатов. Селективность к ионам натрия, хлора и других одновалентных элементов намного ниже. Мембраны пропускают до 85% солей одновалентных металлов. Давление, необходимое для процесса нанофльтрации, составляет 0,35-1,60 МПа. И, таким образом, нанофльтрация может рассматриваться как способ умягчения воды, наряду с ионным обменом и реагентной обработкой.

**Материалы и методы.** При умягчении воды посредством процесса нанофльтрации предусматривают предварительную водоподготовку (осветление, обезжелезивание). Учитывая малые размеры пор нанофльтрационных мембран, требуется удаление из воды взвешенных веществ (содержание в обрабатываемой воде – не более 5 мг/дм<sup>3</sup>), соединений железа (не более 0,3 мг/дм<sup>3</sup>), марганца (не более 5 мг/дм<sup>3</sup>), нефтепродуктов (не более 0,5 мг/дм<sup>3</sup>), которые ускоряют забивание пор, а также ограничивают содержание в воде сильных окислителей (активный хлор, озон, перманганат калия – не более 0,1 мг/дм<sup>3</sup>), которые оказывают негативное воздействие на материал мембраны. Усредненные данные по составу исходной воды, которая направляется на нанофльтрацию, приведены в СН 4.01.01 [4]. Требования к исходной воде указывают производители мембран и производители мембранных модулей.

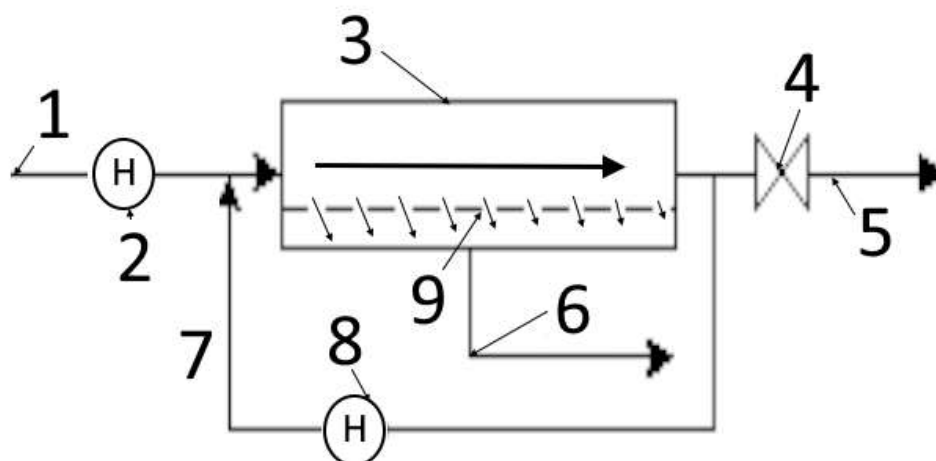
Мембранные модули включают: мембраны, организованные в определенном порядке; корпус; устройства, подводящие исходную воду, отводящие пермеат и концентрат; вспомогательные элементы. Наиболее распространены рулонные, плоские, трубчатые, капиллярные (половолоконные) мембранные модули.

Установка нанофльтрации представляет совокупность мембранных модулей, соединенных друг с другом последовательно или параллельно.

При разделении пермеата и концентрата используют тангенциальное фильтрование. Входящий поток исходной воды подается вдоль поверхности мембраны, и по мере прохождения над ее поверхностью разделяется на два потока: прошедший через мембрану очищенный пермеат и концентрат. Выходящий со стороны, противоположной вводу воды, концентрат, не прошедший через мембрану, содержит большую часть задержанных мембраной примесей.

Соотношение расходов пермеата и концентрата указывают производители мембран. При тангенциальном фильтровании по длине аппарата объемный расход разделяемого потока воды уменьшается из-за прохождения пермеата через мембрану. Также пропорционально снижается скорость концентрата вдоль мембраны, растет концентрация задерживаемых мембраной компонентов, и, соответственно, повышается и концентрация их в пермеате.

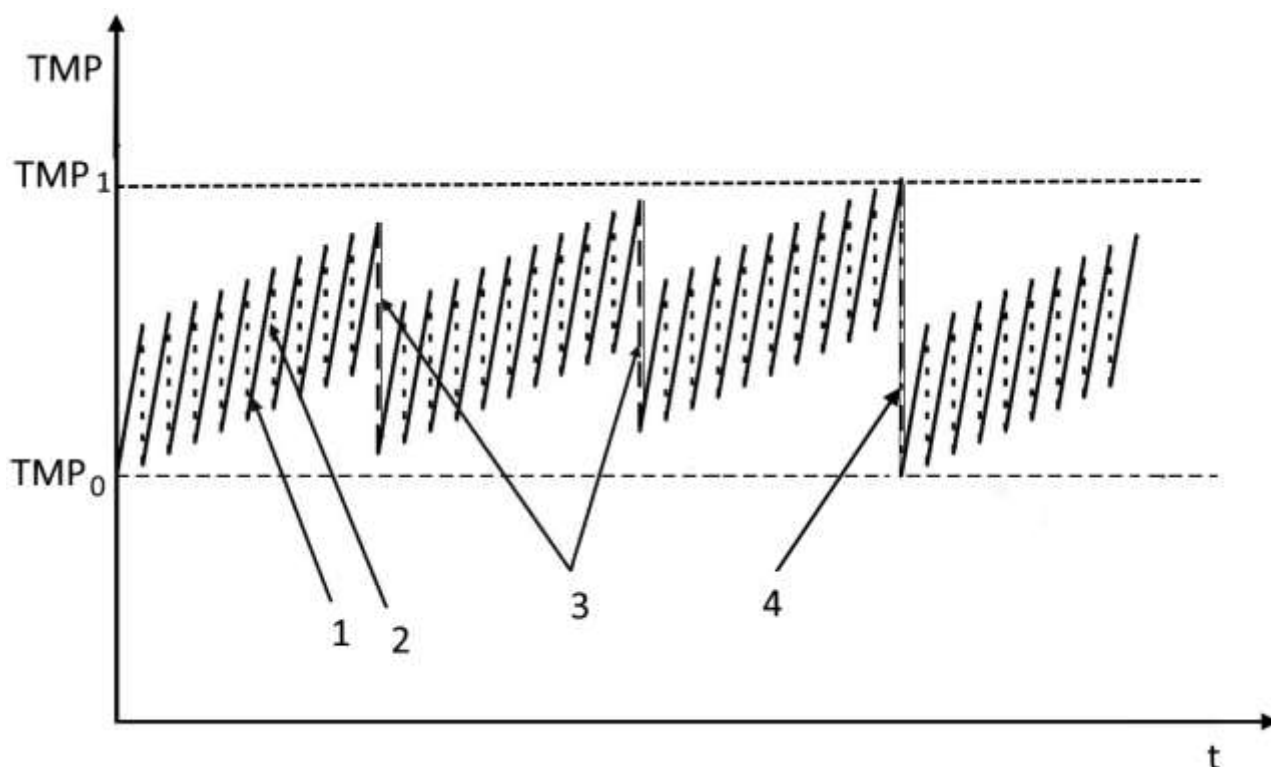
По длине аппарата давление в потоке концентрата над мембраной падает из-за возрастания гидравлического сопротивления, что ведет к уменьшению расхода воды в пермеате. Для снижения расхода питательной воды применяют одноступенчатые и многоступенчатые схемы с циркуляцией концентрата (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Принципиальная схема циркуляционной одноступенчатой мембранной установки

1 – подача исходной воды, 2 – питательный насос исходной воды, 3 – мембранный модуль, 4 – вентиль, 5 – отведение концентрата, 6 – отведение пермеата, 7 – контур циркуляции концентрата, 8 – циркуляционный насос, 9 – мембрана

Таким образом процесс мембранного разделения при нанофильтрации является не стационарным, и дополнительно следует учитывать изменения состояния мембраны. При эксплуатации мембранного модуля происходит снижение проницаемости из-за отложений и забивания пор мембран. Типичный режим работы мембранного модуля приведен на рисунке 2 и включает рабочий режим фильтрования, обратные промывки мембраны водой, обратные промывки мембраны водой и реагентами, реагентную регенерацию мембраны.



**Рисунок 2** – Типовой режим работы мембранного модуля

1–рабочий режим фильтрации, 2 –обратная промывка мембраны водой, 3–обратные промывки мембраны водой и реагентами, 4–реагентная регенерация мембраны,  $TMP_0$ –трансмембранное давление в начальный момент эксплуатации, МПа,  $TMP_1$ – допустимое максимальное трансмембранное давление, МПа

Трансмембранное давление (TMP), МПа, определяется как разность между средним давлением в полости концентрата и давлением в полости пермеата и рассчитывается по формуле

$$TMP = 0,5(P_{исх} + P_{кон}) - P_{пер} \quad (1)$$

где  $P_{исх}$ –давление со стороны подачи исходной воды, МПа;

$P_{кон}$ – давление со стороны отведения концентрата, МПа;

$P_{пер}$ – давление со стороны отведения пермеата, МПа.

Обратная промывка мембраны водой производится с поверхностной нагрузкой, равной или большей чем при фильтрации при продолжительности от 30 до 120 мин. Обратная промывка мембраны водой и реагентами применяется для удаления отложений, которые невозможно удалить водой. Для удаления неорганических отложений используют кислоты (соляную и серную), для удаления органических веществ используют щелочи (гидроксид натрия) и окислители. При этом после обработки мембраны кислотой, как правило, проводится промывка щелочью. Продолжительность обработки мембран реагентами составляет от 5 до 15 мин. Интервалы между промывками принимают от шести часов до нескольких суток, в соответствии с рекомендациями производителей.

Реагентная регенерация мембран производится при снижении проницаемости ниже предельных значений, оцениваемых по трансмембранному давлению.

Интервалы между реагентными регенерациями назначают от нескольких недель до нескольких месяцев. После реагентной регенерации мембраны ее проницаемость должна почти вернуться к исходному значению. Реагентная регенерация мембраны производится непосредственно в мембранном модуле или же вне модуля. Для реагентной регенерации мембран используются:

- раствор NaOH с  $\text{pH} > 11,5$ ;
- соляная или серная кислота с  $\text{pH} < 2,5$ ;
- гипохлорит натрия с концентрацией более 50 мг/л по активному хлору;
- лимонная кислота с концентрацией более 2 г/л.

**Результаты и обсуждение.** Таким образом, при проектировании установок нанофильтрации определяют требуемую производительность с учетом режима работы, включая затраты времени на промывки и регенерации мембран, а также соотношения между расходами концентрата и пермеата. Расход пермеата, который является полезной производительностью, определяют в зависимости от удельного расхода на единицу площади мембраны ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ). Гидравлический КПД установки нанофильтрации определяется как отношение расхода пермеата к суммарному расходу подаваемой на установку исходной воды и рассчитывается по формуле

$$\text{КПД} = \frac{Q_{\text{пер}}t_{\text{пер}} - Q_{\text{пром}}t_{\text{пром}}}{Q_{\text{пер}}t_{\text{пер}}} 100\% \quad (2)$$

где  $Q_{\text{пер}}$  – расход пермеата,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$t_{\text{пер}}$  – продолжительность фильтрования, ч;

$Q_{\text{пром}}$  – расход обратной промывки,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$t_{\text{пром}}$  – продолжительность обратной промывки, ч.

Таким образом, чем чаще для установки проводится обратная промывка, тем ниже гидравлический КПД установки.

При проектировании установок нанофильтрации требуются системы измерений для определения давления (концентрата, пермеата, исходной воды), расхода (концентрата, пермеата). Кроме того, система фильтрации должна оснащаться контрольно-измерительными приборами для измерения: мутности исходной воды, температуры исходной воды, давления при обратной промывке, расхода раствора для промывки и регенерации, pH и температуры раствора для промывки и регенерации.

### **Заключение.**

1. Положительным качеством технологии нанофильтрации, как метода умягчения воды, является задержание кальция и магния без увеличения мине-

рализации обработанной воды, не требуются затраты тепловой энергии на нагрев воды.

2. Технология нанофильтрации для умягчения воды считается безреагентным способом, поскольку реагенты не используются в рабочем режиме. Вместе с тем, эксплуатация установок нанофильтрации требует периодических промывок и химических регенераций мембран. Таким образом, технология нанофильтрации может быть отнесена к безреагентной только условно.

3. Существенное ограничение при использовании нанофильтрации для умягчения производственных вод связано с проблемами отведением сбросных минерализованных вод (концентрата мембранных установок). При обработке значительных расходов производственных вод нанофильтрацией образуются большие объемы минерализованных сточных вод, которые требуют отдельной обработки.

### Список цитированных источников

1. Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 213-5 (A), Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung; Teil 5: Membranfiltration. Bonn, April 2019, 32s.
2. Технический справочник по обработке воды: [в 2 т.: перевод с французского] / [Л. Андриамирадо и др.; науч. ред.: М. И. Алексеев и др.]. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Водоканал Санкт-Петербурга: «Новый журн.», 2007, 1775 с.
3. Первов А.Г. Новые тенденции в разработке современных нанофильтрационных систем для подготовки питьевой воды высокого качества: обзор / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, Р.В. Ефремов, Ю.В. Козлова // Серия. Критические технологии. Мембраны, 2005, № 1 (25), с.18-34.
4. СН 4.01.01-2019 Строительные нормы Республики Беларусь. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Минск, 2020, 78 с.

УДК 662.7, 628.4

## АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ БРИКЕТИРОВАННОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

*А. Н. Пехота<sup>1</sup>, Б. М. Хрусталева<sup>2</sup>, Р. Н. Вострова<sup>3</sup>, Г. И. Маматисаев<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь, [pehota.an@bntu.by](mailto:pehota.an@bntu.by)

<sup>2</sup> Профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь, [tg\\_v\\_fes@bntu.by](mailto:tg_v_fes@bntu.by)

<sup>3</sup> Доцент кафедры «Водоснабжение, химия и экология» УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Республика Беларусь, [vostrova@tut.dy](mailto:vostrova@tut.dy)

<sup>4</sup> Зав. кафедрой «Строительство инженерных коммуникаций», Ферганский политехнический институт, Фергана, Республика Узбекистан