

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН

*А.Г. Первов, Ю.В. Козлова, А.П. Андрианов, Н.Б. Мотовилова**

Кафедра Водоснабжения МГСУ

*ФГУП НИИ ВОДГЕО

Рассмотрены современные технологии очистки поверхностных вод с помощью наночисточных мембран. В основе современных технологических концепций лежит использование мембран трубчатых конфигураций, позволяющих вести процесс без образования осадка на мембранах.

В статье рассматривается возможность применения мембранных аппаратов «классической» рулонной конструкции. Проведены исследования по определению скоростей образования осадков взвешенных органических веществ. Намечены пути усовершенствования рулонных элементов с помощью создания открытого канала, снижающего прирост потерь напора.

Результаты исследования легли в основу создания технологии очистки природных вод на мембранных аппаратах с усовершенствованным каналом, использующую оптимизацию величины транзитного потока и режимов промывок со сбросом давления.

Ключевые слова: наночисточка^к, открытый канал^к, рулонный элемент^к, предочистка^к, взвешенные вещества^н, цветность^н, гидравлические промывки со сбросом давления^н.

State-of-the-art novel surface water treatment techniques using nanofiltration membranes are reviewed. Modern approach to develop nanofiltration method is based on the use of tubular membranes free of stagnation areas providing low fouling operational mode.

The paper presents possibilities of classic spiral wound design for surface water treatment. The research was conducted to determine particulate and organic fouling rates. New ways to improve open-channel configuration of spiral wound modules are outlined to escape delta pressure increase due to fouling.

The results of presented research are used to develop new nanofiltration surface water treatment techniques based on modified spiral wound open-channel membrane elements, using optimum flow rates and flushing modes.

Key-words: nanofiltration, pretreatment, suspended solids, color, open-channel, spiral wound membranes, membrane flushing.

Последние разработки в области очистки воды с применением мембран неожиданно «вскрыли» новые возможности этого метода, обозначили новые направления совершенствования технологии, заставляющие специалистов в этой отрасли пересматривать сложившиеся представления.

Прежде всего, это касается технологических схем установок. Традиционно сложилось представление об обратном осмосе как о «капризном» методе, требующим тщательной предочистки, что делает невозможным его применение для очистки поверхностных вод. Технология ультрафильтрации привлекает внимание своими огромными масштабами внедрения. Вместе с тем, подробное знакомство с этой технологией и ряд неудач при ее применении для подготовки питьевой воды, вызывает определенный скептицизм в ее использовании.

Проблема питьевого водоснабжения с использованием вод поверхностного происхождения связана с удалением из воды основных групп веществ, характеризующихся показателями мутности (вещества во взвешенном состоянии), цветности (органические высокомолекулярные вещества, гуминовые и фульвокислоты массой 500 – 20 000 Да), окисляемости (низкомолекулярные органические вещества, продукты жизнедеятельности бактерий и водорослей). Ультрафильтрационные мембраны задерживают органические соединения с молекулярной массой более 150 – 200 кДа, поэтому они оказываются малоэффективны при снижении цветности и окисляемости. Известны случаи применения ультрафильтрационных мембран для очистки поверхностных вод, где в качестве предочистки используют сооружения осветления (камеры хлопьеобра-

зования, осветлители, отстойники) или применяют прямоточную коагуляцию с дозированием коагулянтов и флокулянтов в исходную воду.

Такая технология не всегда дает положительные результаты (особенно при низких температурах исходной воды и высоких значениях цветности). При фильтровании суспензии через ультрафильтрационную мембрану идет процесс образования осадка на мембране и прирост гидравлического сопротивления. При этом имеет место и необратимый процесс «закупорки» пор ультрафильтрационных мембран, затрудняющий процесс обратной промывки.

Процесс нанофильтрации обладает неоспоримыми преимуществами: отсутствие «закупорки» пор мембран, отсутствие влияния процесса «сжимания» и роста гидравлического сопротивления осадка, отсутствие быстрой потери производительности мембран. При этом нанофильтрационные мембраны эффективно снижают цветность исходной воды (на 70 – 95%) и окисляемость (на 50 – 80%), а также жесткость (на 50 – 80%).

В последнее время активно внедряется новый технологический процесс нанофильтрации, при котором установки работают без предочистки, забирая воду напрямую из реки [1 – 4]. Основная причина эффективности процесса, по мнению авторов, заключается в создании гидравлических условий, не позволяющих взвешенным веществам осаждаться на мембранах. Это достигается за счет трубчатой конструкции канала (трубчатых или капиллярных мембран), за счет гидравлических промывок со сбросом давления, частых химических регенераций, за счет работы при высоких значениях скоростей транзитного потока. В направлениях разработок угадывается тенденция использовать трубчатые конструкции, керамические мембраны для новых процессов.

Характерной чертой для современного состояния мембранного бизнеса является развитие и продвижение новых «авторских» технологий, включающих полный комплекс оборудования и услуг. Фирмы одновременно выступают автором технологии, произ-

водителем мембран, поставщиком установок. Если технологии обратного осмоса и нанофильтрации с использованием рулонных элементов стали «классическими» и освоены многими фирмами, использующие мембранные элементы унифицированных размеров, то в области ультрафильтрации и «новой нанофильтрации» дела обстоят по-другому.

Пример внедрения такого бизнеса фирмами Zenon (Канада), Norit (Нидерланды), Trisep (США) показывает, что мембраны отдельно от технологии и установок не поступают в продажу. В быстро совершенствующихся и развивающихся мембранных технологиях постоянно появляются «неожиданные» решения, в том числе и для специалистов. Например, «на заре» обратного осмоса мембраны в виде полых волокон преподносились как наилучшее решение по увеличению площади мембранной поверхности аппаратов. В последующем, с развитием плоских композитных мембран, увеличением их удельной производительности, полые волокна были «забракованы», причем не только из-за производительности, а по соображениям надежности – большей склонности к загрязнению [3, 4]. А сейчас, компания «Norit» для прямой нанофильтрации речной воды, наоборот, преподносит капилляры (полые волокна) как самую надежную конструкцию, позволяющую избежать загрязнений [1, 2]. Похожая «конкуренция» существует между рулонными элементами и полволоконными аппаратами и в области ультрафильтрации.

В большинстве систем ультрафильтрации, применяемых для природных и сточных вод, используются капиллярные или трубчатые мембраны. При этом бытует общее мнение, что именно такие мембраны обеспечивают эффективные промывки и менее подвержены загрязнению.

Считается, что плоские мембраны в рулонных элементах не выдерживают большего количества обратных промывок, поскольку происходит «отслаивание» мембран от слоя подложки [5]. Тем не менее, конструкция рулонных элементов, как известно, обеспечивает оптимальное соотношение

площади мембранной поверхности и объема аппарата, а также стоимости аппарата [6]. Преодоление же недостатка расслоения мембран обеспечивает более эффективную и выгодную по стоимости технологию ультрафильтрации поверхностных и сточных вод [5].

Обзор современных исследований показывает, что процессы образования отложений на мембранах связаны не только с процессами гидродинамики и массообмена, сколько зависят от химического состава мембран и конструкций мембранных аппаратов [7]. Опыт современных рекламируемых технологий говорит только о том, что процессы формирования отложений при мембранном переносе еще недостаточно глубоко изучены, и «последнее слово» в новых технологиях очистки воды еще не сказано. Утверждения о преимуществах той или иной технологии или конструкции основаны на представлениях отдельных специалистов или представляют собой не более чем рекламный ход.

Более того, вопросы о применимости аппаратов других конструкций недостаточно проработаны. Выбранные трубчатые конструкции (ацетатные, керамические, капиллярные) отличаются главным недостатком – высокой величиной транзитного потока, что делает процесс энергетически невыгодным.

В настоящей работе сделаны шаги к применению традиционных, но усовершенствованных рулонных конструкций для той же цели – обработки природной воды.

Предварительные выводы о возможности успешного применения технологий «без предочистки» или с упрощенной предочисткой сделаны уже давно. В основе этого лежат исследования по изучению механизма осадкообразования. В предыдущих работах уже были сделаны выводы о влиянии не только гидравлических факторов [7, 8], но и конструкций аппаратов на интенсивность загрязнения взвешенными частицами.

Рулонная конструкция признана оптимальной в техническом и конструктивном

плане: большая поверхность, низкая материалоемкость. Недостаток лежит в наличии турбулизатора – сетки, которая является «ловушкой» частиц. Устранение этого недостатка может оказаться решающим для разработки технологии с применением рулонных конструкций. О возможностях создания открытого канала в рулонных элементах говорилось давно [9]. В частности, в работах Р.Риддла говорится о конструкциях «открытого» канала, без турбулизаторной сетки.

В работе [7] описывается механизм образования взвешенных веществ в рулонных элементах. Сетка «экранирует» канал, создавая дополнительное гидравлическое сопротивление потоку (рис. 1). При этом волокна сетки, прикасаясь к поверхности мембран, создают в местах контакта «застойные зоны» без потока, в которых увеличивается концентрация и идет образование осадков взвешенных и коллоидных веществ, а также малорастворимых солей [9, 10]. Благодаря «обрастанию» мест образования осадка, канал еще больше «экранируется», увеличивается продольное сопротивление потоку, снижается величина рабочего давления и, соответственно, уменьшается производительность. Авторами был предложен ряд усовершенствований [10], позволяющих уменьшить влияние турбулизаторной сетки на формирование застойных зон и осадкообразование, а также уменьшить сопротивление канала и снизить темпы прироста сопротивления вследствие осадкообразования.

Ранее были проведены исследования по влиянию конструктивных параметров на осадкообразование, а также влиянию состава мембран и гидравлических параметров на ход процесса с целью исследовать возможность совершенствования рулонной конструкции и использования ее для обработки «напрямую» поверхностных вод с высоким содержанием цветности и взвешенных веществ [10, 11].

В настоящей работе предпринимаются новые шаги по обоснованию применения технологий обратного осмоса и нанофильтрации для очистки поверхностных вод от цветности (органических загрязнений) и

лению скоростей образования осадков коллоидных, органических и кристаллических осадков.

В данной работе ставились цели получить новые данные по:

- 1) влиянию материала мембран на осадкообразование взвешенных веществ и гуминовых соединений;
- 2) влиянию геометрии канала на интенсивность осадкообразования;
- 3) влиянию скоростных режимов на процесс накопления осадков;
- 4) закономерностям осаждения коллоидных и органических соединений на мембранах;
- 5) эффективности борьбы с осадкообразованием с использованием гидравлических и химических промывок.

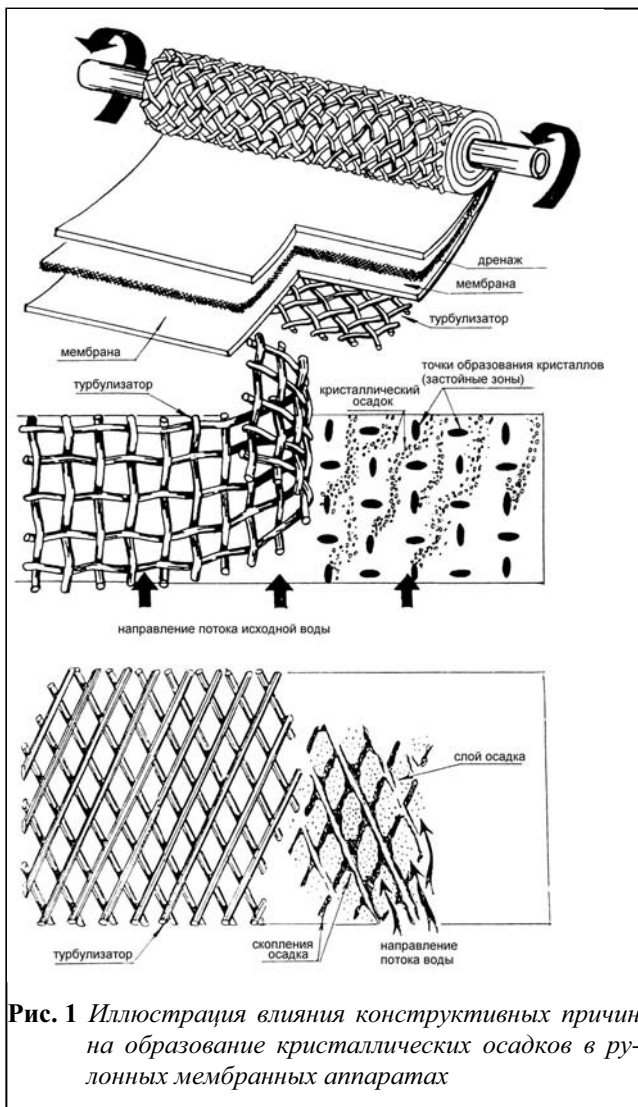


Рис. 1 Иллюстрация влияния конструктивных причин на образование кристаллических осадков в рулонных мембранных аппаратах

мутности (загрязнений взвешенными и коллоидными веществами). Основные предпосылки для создания технологии очистки поверхностных вод без предочистки с использованием рулонных элементов были высказаны нами еще в ранних работах [7, 12] и предложены механизмы осадкообразования, а также методики исследований по опреде-

Программа экспериментов

Для проведения экспериментов были выбраны рулонные элементы стандарта 1812 (диаметр 36 мм, длина 300 мм), с нанофильтрационными мембранами (композитными и ацетатными).

Программа включала:

- изучение скоростей образования осадка в зависимости от гидравлического режима работы мембранного элемента;
- изучение прироста сопротивления в зависимости от количества осадка;
- исследование и оптимизация режима промывки;
- прогноз работы установок (снижения производительности);
- зависимость скоростей образования осадков от типа мембран.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, показанной на рис. 2. В качестве исходной воды использовалась вода реки Десна. Параметры речной воды приведены в табл. 1.

Проба №	Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /л	Щелочность, мг-экв/л	Жесткость, мг-экв/л	Электропроводность, мкСм	рН	Мутность, мг/л	Цветность, мг/л
1	20,4	6,2	5,5	696	7,1	39,1	40,6
2	22,3	5,9	5,4	709	7,09	37,8	43,7

Табл. 1 Исходный состав воды из реки Десна

Методика экспериментов

Определение скоростей осадкообразования проводилось на лабораторной установке в соответствии с методикой, описанной в [8]. Исходная вода помещается в бак (1). Насосом (2) вода забирается из бака (1) и подается в мембранный аппарат (3). Рабочее давление устанавливается с помощью вентиля (4), и определяется по манометру (6). Регулирование скорости транзитного потока осуществляется с помощью вентиля байпаса (5), установленного перед входом в аппарат (3), и направляющего часть потока исходной воды обратно в бак (1). Установка может эксплуатироваться как в режиме циркуляции, так и в режиме концентрирования. В режиме циркуляции концентрат и фильтрат после аппарата (3) направляются обратно в бак (1), при этом объем циркулирующего раствора остается постоянным. Изменяя концентрации различных веществ в циркулирующем объеме, можно определить скорости их осаждения на поверхности мембран с течением времени: количество осажденного на мембране вещества равняется разнице между его количеством в растворе в начале и в конце эксперимента. В режиме циркуляции удобно проводить сравнительные испытания различных мембран и режимов работы.

В режиме концентрирования фильтрат сбрасывается, а концентрат направляется обратно в бак (1), при этом исходная вода постоянно концентрируется. Режим концентрирования полагает моделировать условия в аппаратах при различных значениях выхода фильтрата. Определение гидравлического сопротивления (потерь напора) производится по показаниям манометра (5) При полностью открытом вентиле (4) расход насоса

регулируется закрытием крана (5), и строятся зависимости потерь напора от величины расхода концентрата.

Результаты экспериментов

1. *Определение скоростей сорбции органических веществ и осаждения взвешенных веществ на поверхности мембраны*

В режиме циркуляции были определены зависимости снижения цветности и мутности циркулирующего раствора от времени. Для сравнения использовались аппараты с композитными и ацетатными асимметричными нанофильтрационными мембранами.

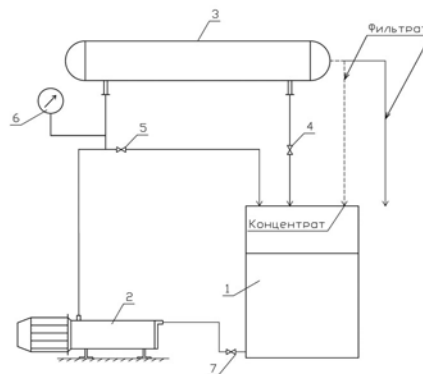


Рис.2. Схема экспериментальной установки для определения скоростей осадкообразования и потерь напора в рулонных элементах. 1 – бак исходной воды; 2 – центробежный многоступенчатый насос; 3 – мембранный аппарат; 4 – регулирующий вентиль; 5 – вентиль байпаса; 6 – манометр; 7 – шаровый кран на баке

Результат сравнительных испытаний показан на рис. 3.

Исходная речная вода предварительно концентрировалась в 3 раза по объему с помощью обратноосмотического аппарата типа 4040. Показатели исходной воды даны в табл. 1.

2. *Определение влияние скоростного режима работы на скорости осадкообразования* проводилось в режиме концентриро-

завершении каждого эксперимента производилась гидравлическая промывка со сбросом давления в течение 5 – 10 с. Результаты полученных данных показаны на рис. 4.

3. *Определение закономерностей накопления осадка*

На основании предварительно полученных результатов было решено провести сравнительные ресурсные испытания рулонных элементов различных конструкций, в ходе которых необходимо было определить:

- снижение производительности и селективности мембранных элементов;
- прирост потерь напора;
- эффективность гидравлических промывок со сбросом давления.

В процессе ресурсных испытаний установка эксплуатировалась в режиме концентрирования. Речная вода помещалась в бак исходной воды, фильтрат собирался в отдельную емкость. Процесс заканчивался при концентрировании исходной воды по объему в 3 раза.

В начале и в течение эксперимента измерялись расходы фильтрата, качество фильтрата и сопротивление мембранного аппарата.

Результаты определений гидравлического сопротивления аппаратов показаны на рис. 5.

На рис. 6 показаны зависимости прироста сопротивления (при транзитном расходе 100 л/ч) и снижения производительности аппаратов от времени в процессе эксплуатации.

Промывки со сбросом давления проводились через 2, 5, 10 и 25 часов непрерывной работы. Промывная вода собиралась, и в пробах определялись мутность и цветность. Характерным для промывок со сбросом давления является то, что цветность промывной воды меняется в зависимости от скорости накопления осадка на мембранах (рис. 7). Обращает на себя внимание также и то обстоятельство, что при промывке выносятся крупные «конгломераты» скоагулированного осадка, которые легко осаждаются в течение 1–2 часов.

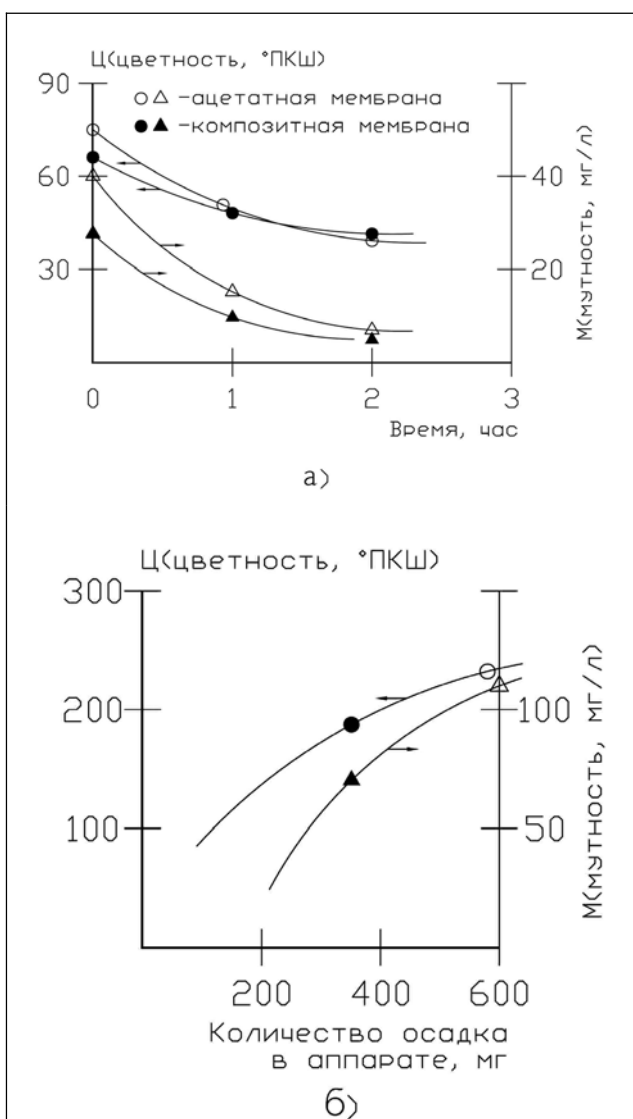


Рис. 3. Результаты циркуляционных экспериментов. а) снижение мутности и цветности исходной воды в экспериментах с ацетатными и композитными нанофильтрационными мембранами; б) влияние материала мембран на эффективность промывки

вания.. Объем исходного раствора изменялся с 60 л до 20 л, давление составляло 4,5 бар, транзитный расход концентрата устанавливался равным 25, 100 и 360 л/ч. По

Обсуждение результатов

1. Скорости образования отложений взвешенных веществ легко и наглядно определяются в режиме циркуляции (рис. 7). Скорости осаждения взвешенных веществ зависят от скорости транзитного потока воды через канал: чем выше скорость, тем меньше осаждается на мембранах взвешенных осадков. Механизм осаждения на мембране состоит, очевидно, в адгезии частиц к по-

верхности. В зависимости от свойств мембраны (гидрофильности, величины поверхностного заряда и т.д.) изменяются скорости осаждения на мембранах взвешенных веществ, органических соединений. Современные разработки ведутся в направлении создания мембран с модифицированной поверхностью, «отталкивающей» ряд загрязнений [5, 13, 14]. Как показывает рис. 8, ацетатные мембраны в меньшей степени

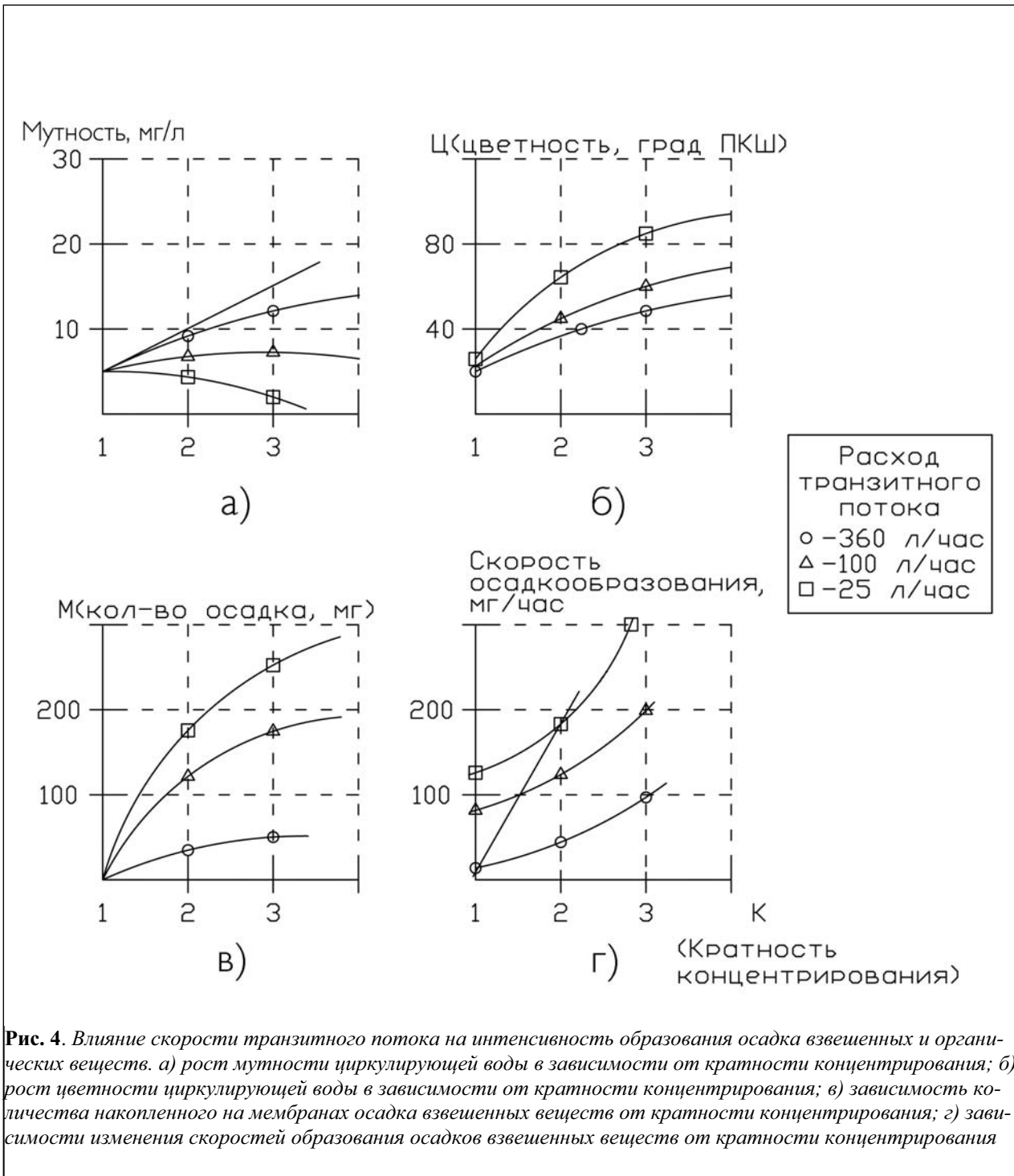


Рис. 4. Влияние скорости транзитного потока на интенсивность образования осадка взвешенных и органических веществ. а) рост мутности циркулирующей воды в зависимости от кратности концентрирования; б) рост цветности циркулирующей воды в зависимости от кратности концентрирования; в) зависимость количества накопленного на мембранах осадка взвешенных веществ от кратности концентрирования; г) зависимость изменения скоростей образования осадков взвешенных веществ от кратности концентрирования

подвержены органическим и коллоидным загрязнениям.

Механизм образования на мембранах отложений органических веществ, образующих цветность, достаточно подробно был изучен в предыдущих работах [7, 15]. В основе механизма лежит сорбция мембранной поверхностью молекул органических веществ из растворов. Представляет интерес изучить, какая часть (фракция) содержащихся в воде соединений наиболее интенсивно сорбируется мембраной. Для этого очень эффективно может быть применен анализ молекулярно-массового распределения. В зависимости от величины молекулярной массы можно «выявить» вещества, наиболее

активно осаждающиеся на мембране, и определить интенсивности их осаждения.

На рис. 9 показаны результаты определения спектров ММР, проведенных для исходной речной воды и фильтрата [11].

В настоящее время хроматографические анализы ММР достаточно трудоемки. Вместо ММР для выявления природы и концентрации осаждающихся на мембранах веществ упрощенно могут быть использованы спектрограммы (рис. 10). При «сканировании» природных вод спектрограммы дают в диапазоне желтого света (420–500 нм) характерные «максимумы», напоминающие спектр ММР, соответствующие «прыжкам» в концентрациях органических веществ, с

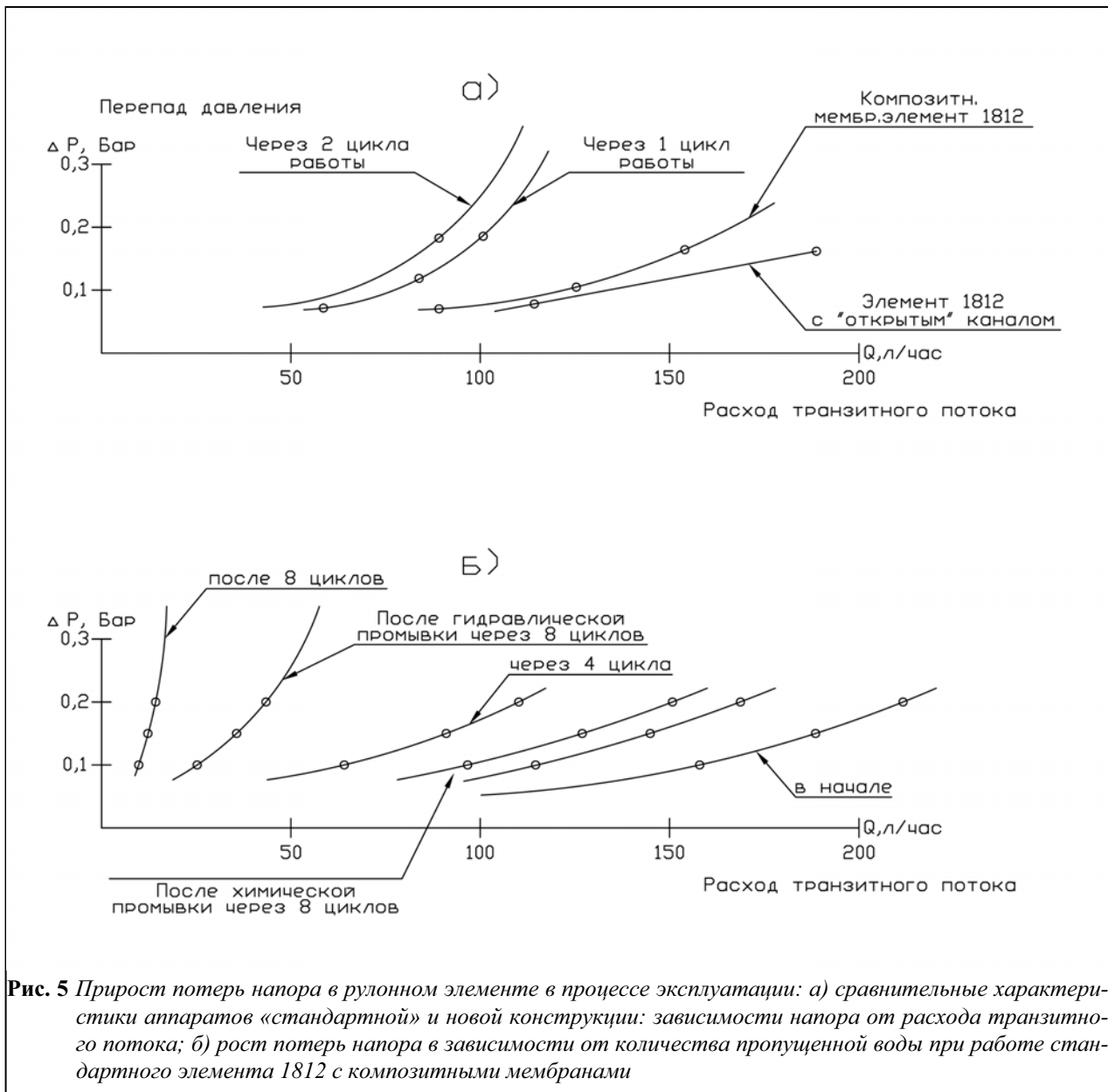


Рис. 5 Прирост потерь напора в рулонном элементе в процессе эксплуатации: а) сравнительные характеристики аппаратов «стандартной» и новой конструкции: зависимости напора от расхода транзитного потока; б) рост потерь напора в зависимости от количества пропущенной воды при работе стандартного элемента 1812 с композитными мембранами

молекулярной массой 1,2 и 6 кДа.

Исследуя в циркуляционном режиме концентрации различных «фракций» в воде, можно определить типы наиболее интенсивно осаждающихся веществ и скорости их осаждения (рис. 11, 12).

2. Скорости осаждения взвешенных веществ зависят от скорости транзитного потока воды через канал. Как видно из рис. 4,

чем выше скорость, тем меньше осажается на мембранах взвешенных осадков.

Вместе с тем, с растворенными органическими веществами наблюдается «обратная» картина: чем выше скорость потока, тем интенсивнее накапливаются в аппарате органические вещества. Это может иметь два объяснения. Первое: образующиеся осадки взвешенных веществ «блокируют» поверхность мембраны, сорбирующую органиче-

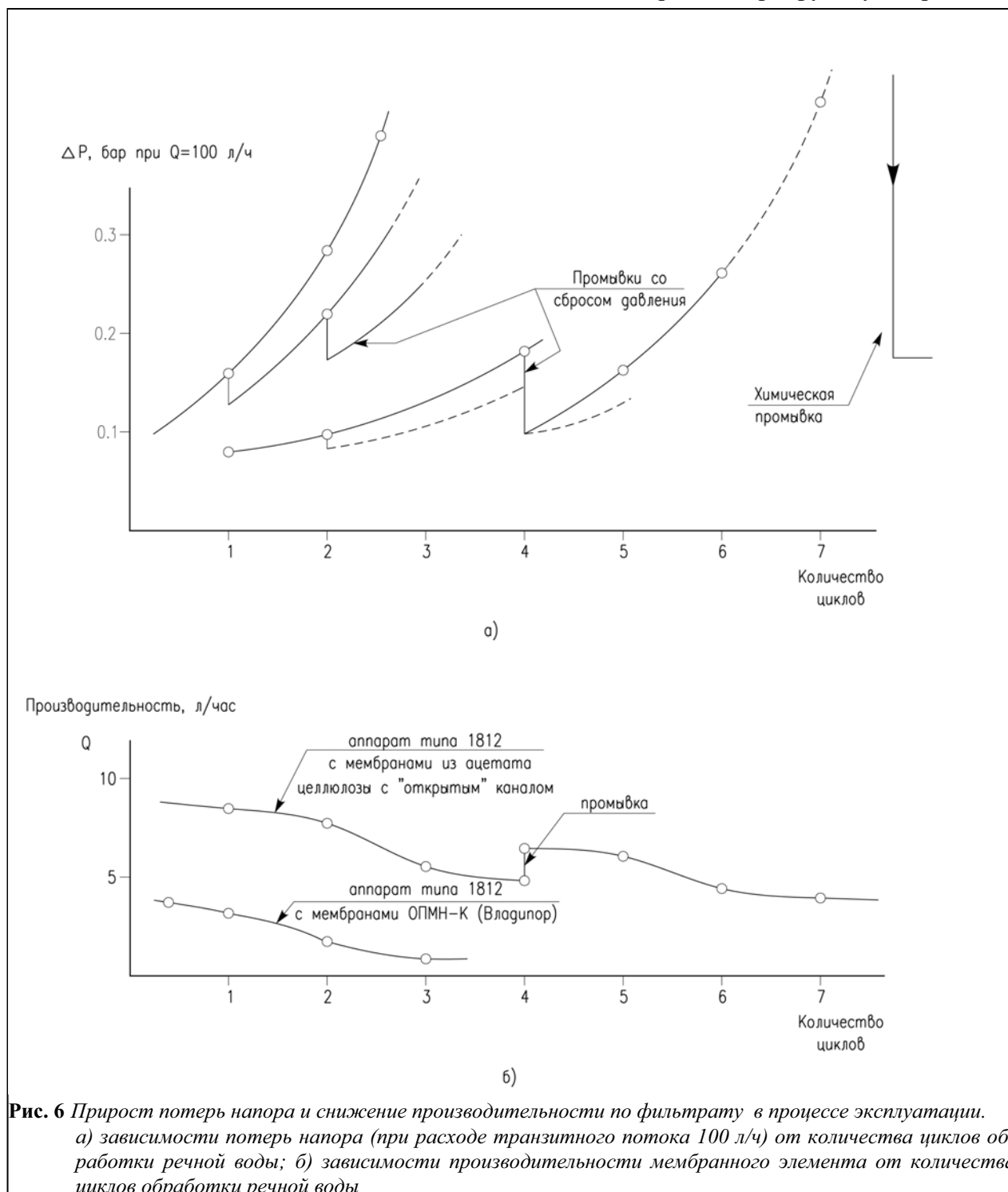


Рис. 6 Прирост потерь напора и снижение производительности по фильтрату в процессе эксплуатации. а) зависимости потерь напора (при расходе транзитного потока 100 л/ч) от количества циклов обработки речной воды; б) зависимости производительности мембранного элемента от количества циклов обработки речной воды

ские вещества. И второе: процесс сорбции части органических веществ, содержащихся в воде, идет в соответствии с диффузионным механизмом, и оказывается тем интенсивнее, чем больше скорость потока.

3. Программы работы установки со сбросом давления показывают эффективность процесса: в течение нескольких секунд с мембран «срывается» накопленное за предыдущие часы работы большое количество осадка взвешенных и органических веществ. Однако анализ сбрасываемой воды после гидравлических промывок показывает, что цветность промывной воды неодинакова. В ряде случаев цветность сбросной воды составляет 200–300 градусов ПКШ, а в ряде случаев – 15–30 градусов, т.е. меньше, чем цветность очищаемой воды. Это наводит на мысль о взаимодействии осадка и растворенных органических веществ. Осадок «сорбирует» цветность: водный гумус содержит амидные и пептидные связи, которые сорбируют анионы слабых кислот (фульвокислот). Замечена закономерность: чем больше осадка накопилось на мембране, тем больше цветность сбросной воды, и

наоборот: чем менее интенсивно шло накопление осадка взвешенных веществ (при большой скорости потока), тем меньше цветность сбросной воды (рис. 7). Причем, чем больше образовалось (вынеслось) осадка, тем ниже цветность. Это показывает, что:

- сорбируемая мембраной цветность плохо удаляется при гидравлической промывке;
- сорбируемая осадком цветность хорошо выносится и «связи» разрушаются, цветность промывной воды велика;
- осадок сорбирует цветность даже во взвешенном состоянии;
- скорость сорбции цветности мембраной гораздо выше скорости сорбции осадком.

4. Геометрия канала оказывает решающее влияние на эффективность работы аппарата во времени. По мере накопления загрязнений растет продольное гидравлическое сопротивление канала (рис. 6а). Снижение производительности мембран напрямую связано с приростом гидравлического сопротивления (рис. 6б), что объясняется

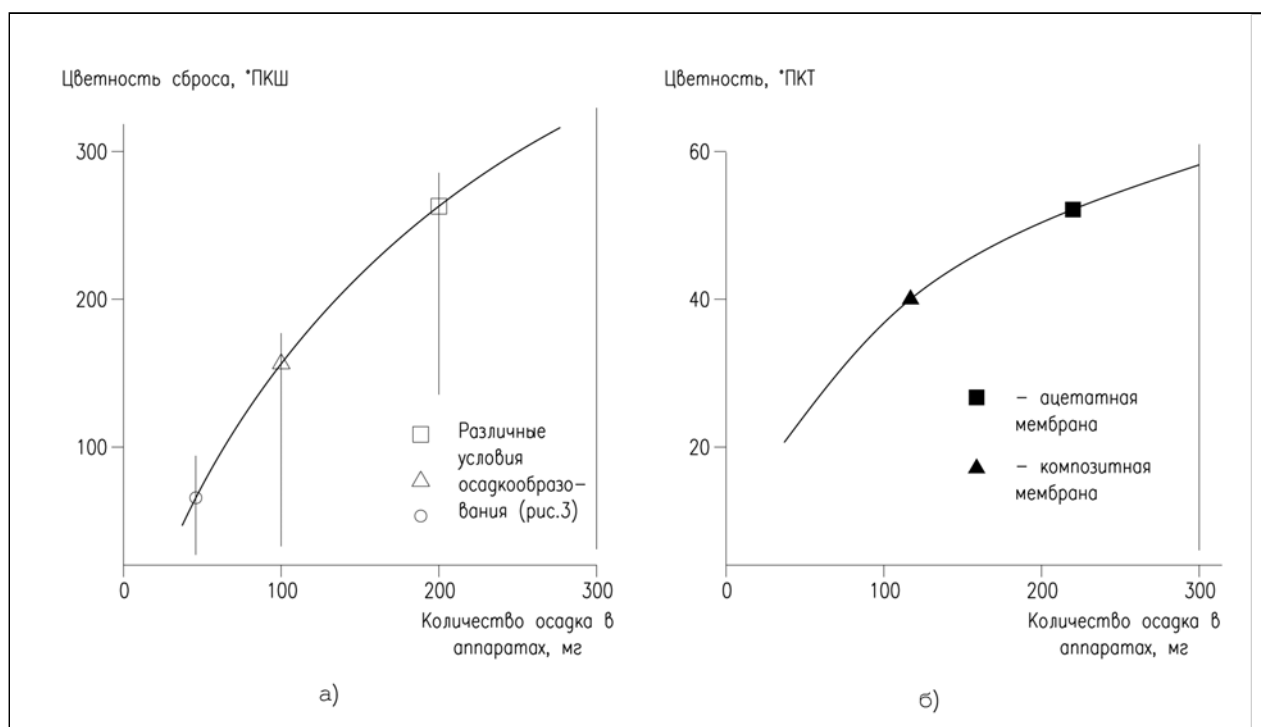


Рис. 7 Влияние материала и типа мембраны на накопление в аппарате осадка и эффективность промывок со сбросом давления. а) цветность промывной воды в зависимости от количества накопленного осадка взвешенных веществ; б) мутность промывной воды в зависимости от количества накопленного осадка взвешенных веществ

уменьшением величины рабочего давления. При этом селективность мембран не падает. Гидравлические промывки со сбросом давления являются эффективной мерой, однако при определенном нарастании сопротивления (уплотнении осадка) промывки оказываются малоэффективными, после чего рекомендуются химические регенерации.

При испытаниях аппаратов новой конструкции с уменьшенным гидравлическим сопротивлением (рис. 5), интенсивность прироста гидравлического сопротивления, и, соответственно, уменьшения производительности, значительно снижается. Это дает основания считать возможной эксплуатацию нанофильтрационных аппаратов без предочистки.

5. Представляет интерес проведения дополнительных исследований по оптимизации эксплуатационных затрат при ведении описанного выше процесса нанофильтрации: снижение расхода электроэнергии (снижение скоростей транзитного потока), увеличение выхода фильтрата, снижение потребления моющих растворов. На основании уже полученных данных получены кривые оптимизации эксплуатационных затрат (рис. 13).

Выводы

1. Возможность работы без предочистки (при содержании взвешенных веществ в исходной воде до 50 мг/л) заключается в конструкции канала напорного тракта мембранного аппарата. Модернизация канала позволяет вести процесс с использованием аппаратов рулонной конструкции. В основе снижения производительности мембранного аппарата в процессе образования осадка лежит рост сопротивления и уменьшения величины рабочего давления.
2. Результаты проведенных исследований могут быть использованы в разработке технологии, в основе которой лежат: выбор типа полимерных мембран; использование специальных конструкций рулонных элементов и аппаратов; выбор режима гидравлических и химических регенераций.
3. Новые исследования должны изучить:
 - возможности подбора новых характеристик мембран, эффективных для снижения ряда загрязнений;
 - возможности подбора состава мембран, позволяющих «отторгать» ряд содержащихся в воде загрязнений (бактерий, коллоидов, органических веществ), и, благодаря этому, обеспечивающие дли-

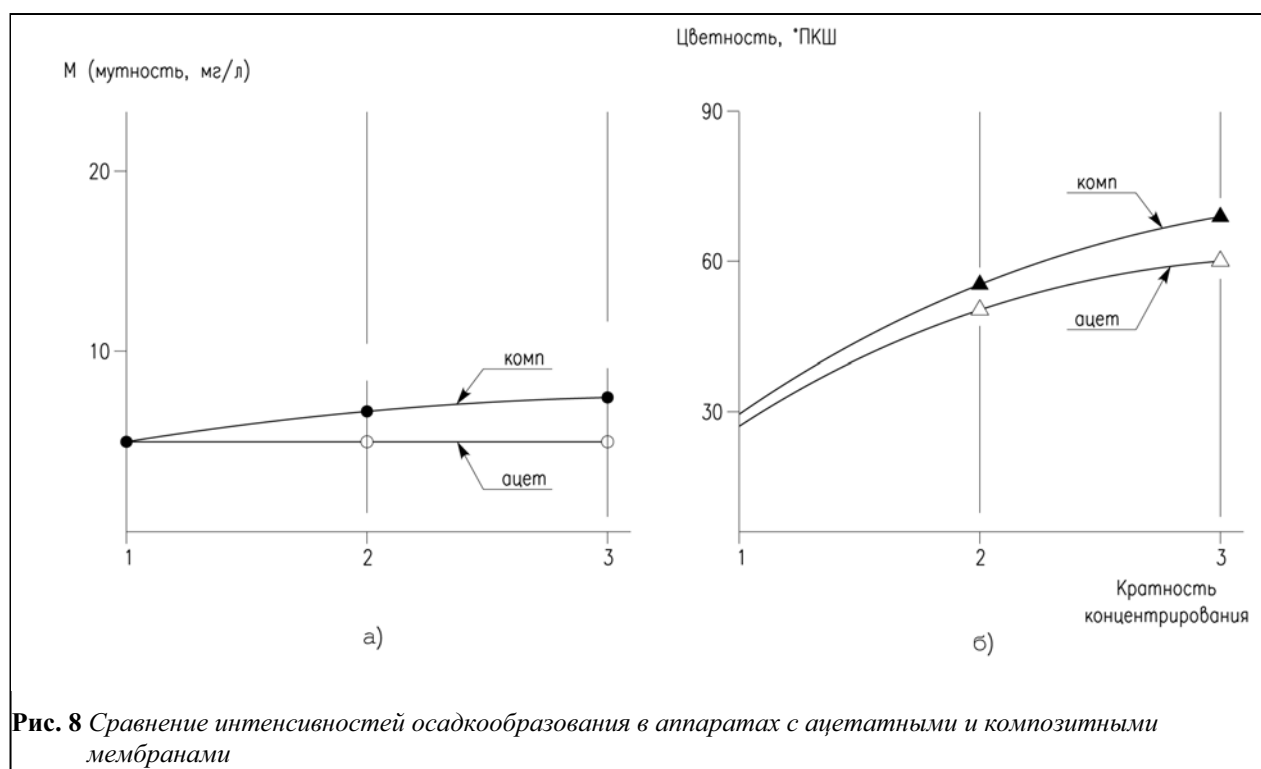


Рис. 8 Сравнение интенсивностей осадкообразования в аппаратах с ацетатными и композитными мембранами

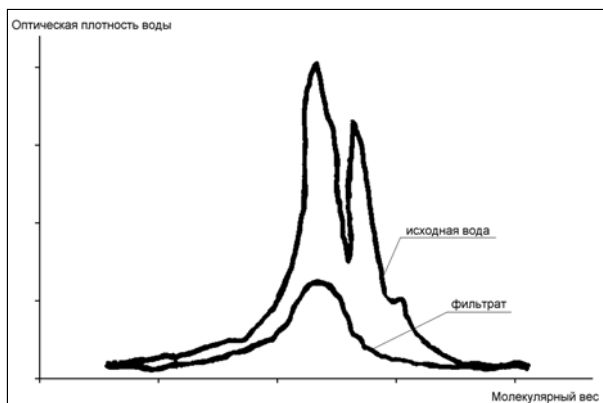


Рис.9. Спектр молекулярно-массового распределения органических веществ в речной воде и фильтрате речной воды, полученном на нанофильтрационном аппарате марки NTR-7410 (Nitto-Denko) [11]

тельную работу мембран с минимальным осадкообразованием и эффективным удалением загрязнений при гидравлических промывках;

- возможности создания конструкций каналов, технологичных при изготовлении, с минимальным количеством застойных зон;
- возможности оптимизации эксплуатационных затрат, обеспечивающие минимальный расход транзитного потока, максимальный выход фильтрата, минимальный расход электроэнергии.

4. Обзор современных технологий в области водоподготовки позволяет наметить общую складывающуюся тенденцию в разработках мембран – для каждого случая применения мембран существует свой оптимальный процесс: тип мембран, тип аппаратов, тип установки.

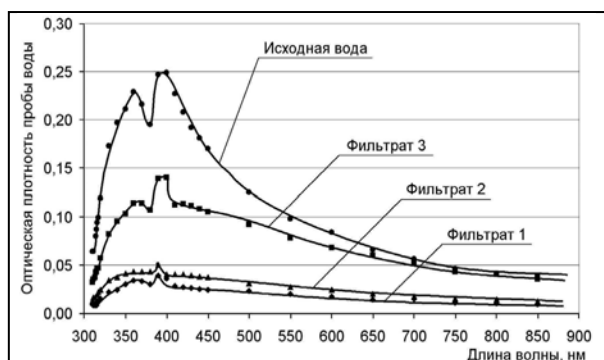


Рис.10. Результаты спектроскопии исходной воды и фильтрата. Зависимость светопоглощения от длины волны. Максимум соответствует концентрации органических веществ [15]

Пробы	Цветность, град	Выход фильтрата, %	Удельная электропроводность, $\mu\text{Sm}\cdot\text{cm}$
Исходная вода	117	-	630
Фильтрат 1	11	55	110
Фильтрат 2	6	60	200
Фильтрат 3	6	80	550

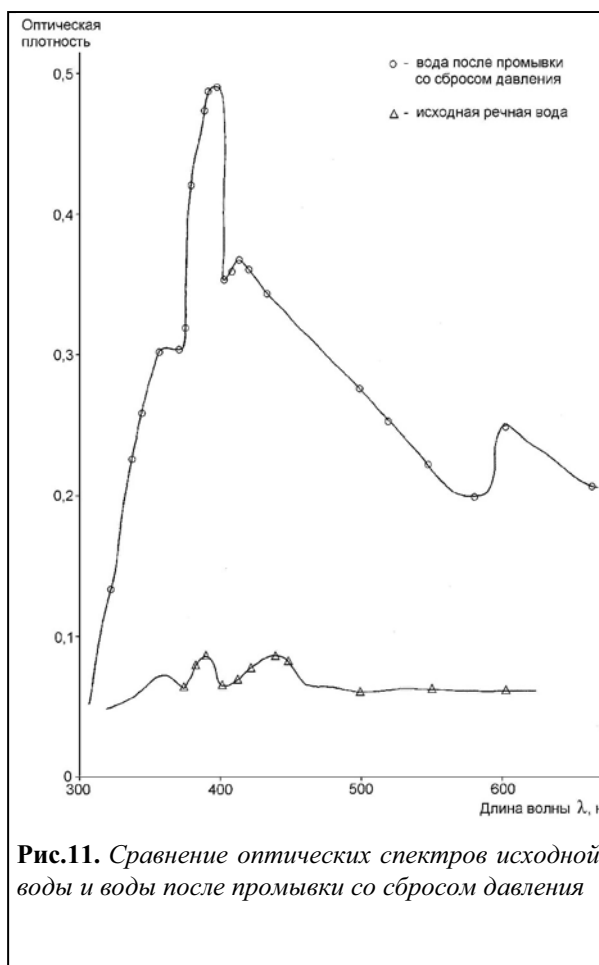


Рис.11. Сравнение оптических спектров исходной воды и воды после промывки со сбросом давления

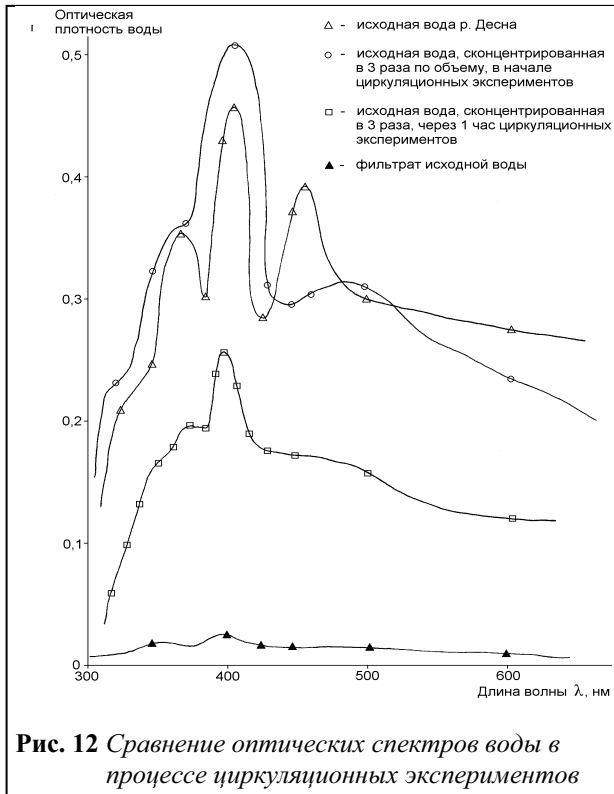


Рис. 12 Сравнение оптических спектров воды в процессе циркуляционных экспериментов

Литература

1. *Futselaar M. et al.* Direct capillary nanofiltration for surface water. // *Desalination*. V. 157 (2003), p. 135-136.
2. *Futselaar H., Schonewille H., Meer W.* Direct capillary nanofiltration for surface water. (Presented at the European Conference on Desalination and the Environment: Fresh Water for All, Malta, 4-8 May 2003. EDS, IDA) // *Desalination*. 2003. Vol.157, p. 135-136.
3. *Bruggen B., Hawrijk I., Cornelissen E., Vandecasteele C.* Direct nanofiltration of surface water using capillary membranes: comparison with flat sheet membranes. // *Separation and Purification Technology*. 2003.
4. *Bonné P.A.C., Hiemstra P., Hoek J.P., Hofman J.A.M.H.* Is direct nanofiltration with air flush an alternative for household water production for Amsterdam? // *Desalination*. 2002. V. 152, p. 263-269.
5. Интернет сайт *Trisep* <http://www.trisep.com>
6. Интернет сайт *PIC Membranes* <http://www.picmem.com>
7. *Pervov Alexei G., Melnikov Audrey G.* The determination of the required foulant removal degree in RO feed pretreatment. // *IDA world conference on Desalination and Water reuse August 25-29, 1991, Washington. Pre-treatment and fouling.*
8. *Pervov A.G.* A simplified RO process design based

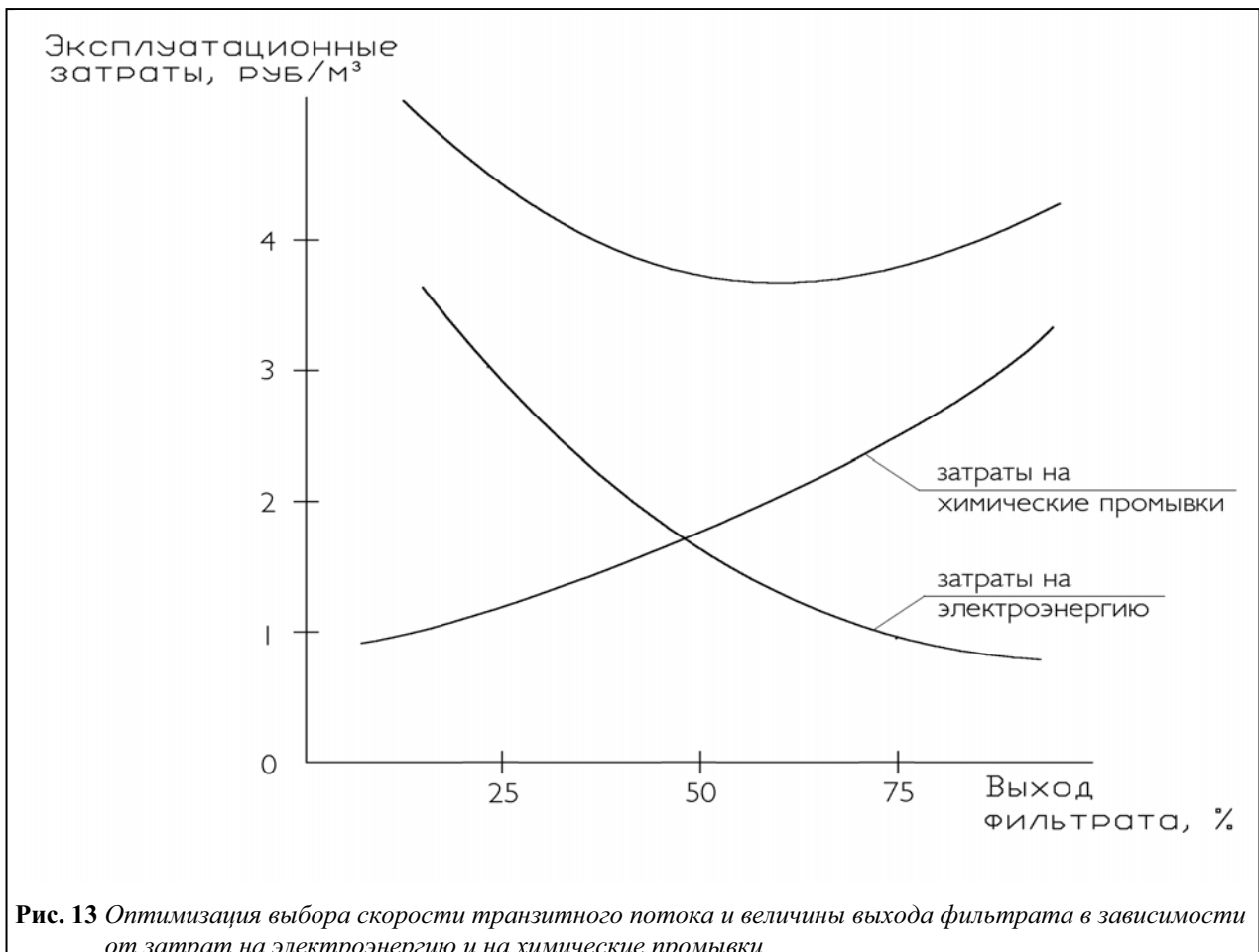


Рис. 13 Оптимизация выбора скорости транзитного потока и величины выхода фильтрата в зависимости от затрат на электроэнергию и на химические промывки

on understanding of fouling mechanisms. // *Desalination* 1999, Vol. 126.

9. *Riddle Richard A.* Open channel ultrafiltration for reverse osmosis pretreatment. // *IDA world conference on Desalination and Water reuse August 25-29, 1991, Washington. Pretreatment and fouling.*

10. *Первов А.Г.* «Мембранный рулонный элемент», Патент №2108142, выд. 10.04.1998 г.

11. *Irvine Ed, Welch David, Smith Alan, Rachwal Tony.* Nanofiltration for colour removal - 8 years operational experience in Scotland. // *Proc. of the Conf. on Membranes in Drinking and Industrial Water Production. Paris, France, 3-6 October 2000. V 1, p. 247-255.*

12. *Pervov A.G.* Scale formation prognosis and cleaning procedure schedules in reverse osmosis operation. // *Desalination* 1991, Vol. 83.

13. *Hilal Nidal, Al-Khatib Laila, Atkin Brian P., Kochkodan Victor, Potapchenko Nelya.* Photochemical modification of membrane surfaces for (bio)fouling reduction: a nano-scale study using AFM // *Desalination* 2003, Vol. 156, p. 65-72.

14. *Hilala Nidal, Mohammad A. Wahab, Atkina Brian, Darwish Naif A.* Using atomic force microscopy towards improvement in nanofiltration membranes properties for desalination pre-treatment: A review // *Desalination* 2003, Vol. 157, p. 137-144.

15. *Первов А. Г., Мотовилова Н. Б., Андрианов А. П., Ефремов Р. В.* Разработка систем очистки цветных вод северных районов на основе технологий нано-фильтрации и ультрафильтрации. // *Очистка и кондиционирование природных вод. Сборник научных трудов. Вып. 5. М.: 2004, стр. 99-106.*