

УДК 628.16.081.63

Ельшин А.И., Вегера А.И.

**ОЧИСТКА ВОДОПРОВОДНОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ:  
ПРЕДФИЛЬТР - ПРОТОЧНАЯ МЕМБРАННАЯ ЯЧЕЙКА**

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина 29, 211440 г. Новополоцк

**Резюме**

*Работа посвящена исследованию работы системы предфильтр - проточная мембранная ячейка при фильтровании водопроводной воды. В качестве предфильтра перед микрофильтрационной и ультрафильтрационной мембраной было использовано трикотажное лавсановое полотно типа ПТТФ. Полученные результаты свидетельствуют о росте производительности процесса мембранного разделения и увеличения срока службы мембран за счет снижения количества взвешенных веществ попадающих на мембрану. Выигрыш в производительности имеет тенденцию к экспоненциальному росту с увеличением объема фильтрата полученного на микрофильтрационной мембране. Причиной роста производительности является изменение соотношения объемных долей в осадке крупных и мелких частиц. В результате распределение частиц по размерам смещается от бимодального к унимодальному. Для ультрафильтрационной мембраны рост производительности составил 15 – 20%, для микрофильтрационной мембраны – соответственно 50 – 150%.*

**Введение**

Интенсивно развивающаяся мембранная технология очистки воды, характеризуется высокой эффективностью, низким энергопотреблением и способностью интегрироваться в водные технологии как промышленности, так и бытовые. Однако этот процесс очень

чувствителен к загрязнениям, присутствующим в воде, в частности, к коллоидным. Поэтому существует необходимость защиты мембран от избыточных взвешенных веществ в воде для увеличения срока службы и поддержания ее производительности.

Снизить негативное воздействие дисперсных частиц, присутствующих в исходной воде, на производительность мембранного модуля можно путем предварительного удаления частиц крупной фракции и части мелкой фильтрованием через предфильтр, установленный на входе мембранного модуля. Применяются разнообразные фильтрующие материалы в качестве предфильтров: от зернистых слоев до мембранных микрофильтров.

Используемые на стадии предочистки воды фильтры с порошковым и гранулированным активированным углем, колонны с ионообменными смолами в случае содержания в исходной воде механических примесей, коллоидов и органики начинают работать как глубинные фильтры, что приводит к их преждевременной забивке и выходу из строя. Этого можно избежать, применяя предварительные фильтры, для удаления основной массы крупных частиц и других загрязняющих материалов из подаваемой в мембранный модуль воды [1-5].

Многие зарубежные фирмы рекомендуют предфильтры с тонкостью фильтрования менее 1 микрона, однако, такого рода фильтры имеют высокую стоимость до 40-60 долларов США и не всегда являются рациональным решением проблемы [6]. Авторы [7] на обратноосмотических установках рекомендуют 5-ти микронные предфильтры в случае полволоконных мембранных модулей и 10-20 микрон для спиральных.

В Республике Беларусь, где водопроводная вода содержит железо и другие вещества образующие коллоиды, сегодня ощущается недостаток исследований связанных с понижением уровня загрязненности водопроводной воды на стадии предочистки при использовании мембран. Хотя содержание взвешенных веществ в водопроводной воде не регламентируется ГОСТ [8], при длительной эксплуатации мембранных модулей без дополнительной предочистки воды происходит преждевременная потеря их

производительности. Разработка простых и эффективных способов защиты фильтров тонкой очистки и мембран от коллоидных загрязнений позволит широко внедрить мембранную технологию особенно для нужд пищевой промышленности, медицины и быта.

### **Постановка задачи**

Несмотря на то, что водопроводная вода перед подачей в распределительную сеть проходит очистку на станции водоподготовки, при поступлении к потребителю в ней могут оказаться примеси в виде твердых частиц и коллоидов. Опыты с водой из водопроводной сети показывают [9], что загрязнения представляют собой полидисперсную систему, в которой выделяются две основные фракции: крупные частицы (ржавчина и подобные механические примеси) с размером порядка 4 – 5 микрон (~ 30%) и коллоидные частицы в виде оксидов железа с размером менее 0,5 микрон (~ 70%). Такого рода дисперсные системы с соотношением размера частиц основных фракций  $\delta = D/d > 8 - 10$  формируют плотные осадки с низкой пористостью. Здесь  $D$  - средний размер крупных частиц,  $d$  - средний размер коллоидов.

В соответствии с [10], в бинарных смесях сферических частиц с соотношением размеров  $\delta = 6,67$  и  $16,67$  отношение пористости бинарного слоя  $\varepsilon$  к пористости монослоя  $\varepsilon_0$  составило соответственно  $\varepsilon/\varepsilon_0 = 0,55$  и  $0,45$ . По данным [11] для  $\delta = 5,1$   $\varepsilon/\varepsilon_0 = 0,67$ . С увеличением отношения  $\delta$  пористость бинарной смеси стремится к величине порядка  $0,2 - 0,16$  [12]. При изменении пористости с  $0,4$  до  $0,3$  проницаемость слоя, при прочих равных условиях, уменьшается в  $3,22$  раза.

При разделении дисперсных систем с широким спектром дисперсных частиц, перед использованием высокоэффективной, но дорогостоящей пористой среды (например, фильтр тонкой очистки), или перед мембранным модулем экономически целесообразно предварительное удаление грубых фракций с помощью фильтровальных материалов,

имеющих достаточно высокую эффективность, при относительно невысокой стоимости и возможностью их многократного использования [13].

Предварительные исследования и имеющийся опыт применения трикотажных материалов типа ПТТФ в качестве фильтров делает их привлекательными для использования в предочистке водопроводной воды.

Цель исследований – изучение работы трикотажного предфильтра в процессах мембранной очистки воды, а также возможности за счет предочистки увеличения производительности процесса и срока службы мембраны.

## **Эксперимент**

В качестве мембран были использованы мембраны производства ООО МИФИЛ и института физико-органической химии АН РБ: микрофильтрационная (МФ) с диаметром пор 0,1 мкм и ультрафильтрационная (УФ) ПА-20, диаметр пор 0,03 мкм.

Предфильтром служил многослойный трикотажный материал ПТТФ-36 [14] с толщиной фильтрации 10 микрон, разработанный в Витебском государственном университете (ВГУ) под руководством доцента В.А. Петровой. Фильтровальные материалы типа ПТТФ весьма привлекательны для использования в качестве предфильтра, так как помимо высокой эффективности и относительно низкой стоимости они обладают высокой прочностью, хорошей регенерируемостью, химической стойкостью и низким гидравлическим сопротивлением [15]. Материалы ПТТФ хорошо зарекомендовали себя при фильтрации разных дисперсных сред [15-19], однако их использование для предочистки водопроводной воды изучено мало.

Фильтроматериалы ПТТФ представляют собой трикотаж повышенной толщины, поверхностного и объемного заполнения [15, 20, 21], поэтому они обладают преимуществами объемных и поверхностных фильтров. По сравнению с фильтровальным

картоном и тканями, трикотажные фильтры имеют более низкую стоимость единицы проницаемости [13].

Экспериментальная установка с проточной мембранной ячейкой для очистки водопроводной воды показана на рис.1. К водопроводу через кран 1 была подключена тупиковая фильтровальная ячейка 2 с предфильтром ПТТФ, связанная, в свою очередь, с проточной мембранной ячейкой 3 (рабочая площадь  $16 \times 60 \text{ мм}^2$ ). В проточной ячейке устанавливалась МФ или УФ мембрана. Концентрат из проточной ячейки сбрасывался в слив. Заданный перепад давления через мембрану поддерживался с помощью крана 4. Пермеат собирался в приемную емкость 5. Вентильми 6 и 7 поток воды можно направить через предфильтр, либо в обход его. Манометр 8 служил для контроля давления в водопроводной сети, а манометр 9 – перепада давления через мембрану. Контроль расхода концентрата производился расходомером 10. По показаниям расходомера 10 рассчитывалась скорость тангенциального течения над мембраной.

В ходе экспериментов, с помощью индекса заиливания (Silt Density Index) контролировалось содержание взвешенных веществ (фильтруемость) водопроводной воды на входе в систему [5, 22, 23]. Значение индекса заиливания водопроводной воды было в пределах 4,8-5,0 единиц. Предочистка воды рекомендуется, если индекс заиливания 3 – 5 единиц [5]. В работе [24] предъявляются еще более жесткие требования к качеству воды: для обратноосмотических мембран в виде полых волокон индекс заиливания должен быть  $\leq 3$ ; для ультрафильтрационных мембран  $\leq 2$ .

После каждого эксперимента ПТТФ регенерировался промывкой обратным током водопроводной воды в течение 5 минут.

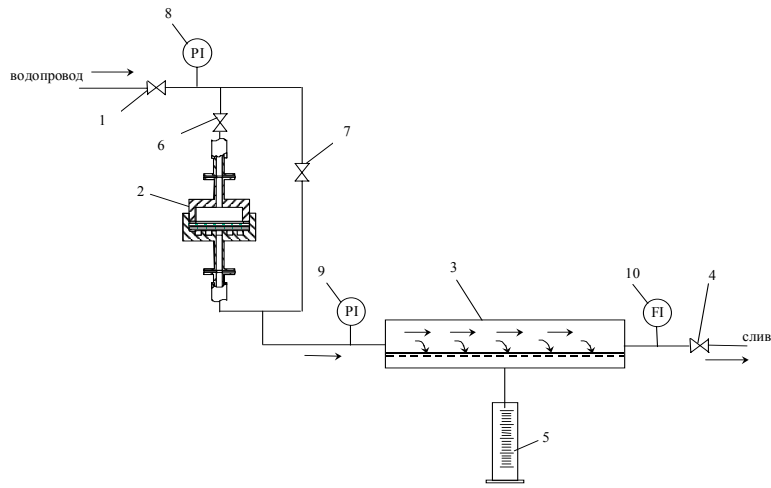


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с проточной мембранной ячейкой для фильтрации водопроводной воды. Площадь предфильтра  $0,001 \text{ м}^2$ , площадь мембраны в проточной фильтровальной ячейке  $0,001 \text{ м}^2$ . Перепад давления через мембрану:  $0,1 \text{ МПа}$ . Давление водопроводной сети:  $0,22 \text{ МПа}$ . Скорость тангенциального течения над мембраной  $0,3-0,5 \text{ м/с}$ .

## Обсуждение результатов

Индекс заиливания, измеренный за предфильтром ПТТФ находился в среднем на уровне  $3,5$  с тенденцией к снижению по мере увеличения объема прошедшей через фильтр воды. Это связано с осаждением загрязнений в объеме фильтроматериала приводящем к повышению эффективности фильтра. Явного образования осадка на поверхности ПТТФ не наблюдалось.

Эффективность применения ПТТФ оценивалась по проценту прироста средней удельной производительности мембраны  $q/t$ :

$$\Delta = \frac{q_f/t_f - q_0/t_0}{q_0/t_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $q_0$  и  $q_f$  - удельный объем фильтрата полученного с единицы площади мембраны, соответственно без предочистки водопроводной воды и с применением ПТТФ,  $m^3/m^2$ ;  $t_0$  и  $t_f$  - соответственно время фильтрования без предочистки воды и при использовании ПТТФ.

На рис. 2 и 3 представлены осредненные по 5 пробегам экспериментальные результаты фильтрования водопроводной воды на проточной мембранной ячейке без предочистки и с предочисткой на ПТТФ.

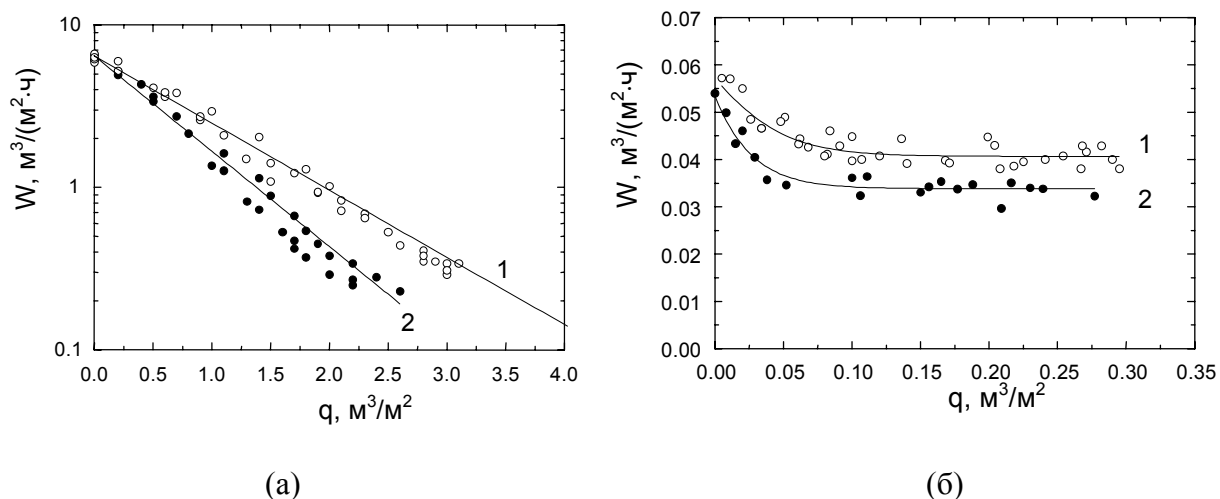


Рис. 2. Средней удельной производительность  $W$  проточной мембранной ячейки в зависимости от удельного объема фильтрата  $q$  водопроводной воды: (а) – микрофильтрационная мембрана. (б) – ультрафильтрационная мембрана. 1 – при наличии предфильтра ПТТФ, 2 – без предварительной предочистки воды.

Как видно из рис. 2, для ультрафильтрационной мембраны увеличение производительности составляет до 20 - 24%. Еще более существенный выигрыш в производительности достигается при сочетании ПТТФ с микрофильтрационной мембраной: от 20% при  $q \sim 0,1 m^3/m^2$  до 200% при  $q \sim 2,5 m^3/m^2$ .

Обработка экспериментальных данных в характеристических координатах, соответствующим различным законам фильтрования [25, 26] показала, что фильтрование через микрофильтрационную мембрану происходит по закону фильтрования с постепенным

закупориванием пор, рис. 3. Фильтрацию с постепенным закупориванием пор соответствует линейная зависимость в координатах  $t/q - t$  и уравнением

$$t/q = kt + 1/W_0 \quad (2)$$

где  $k$  - коэффициент, характеризующий сопротивление осадка;  $W_0 = \Delta p / (\mu R_m)$  - начальная скорость фильтрования;  $\Delta p$  - перепад давления на мембране;  $\mu$  - вязкость жидкой фазы;  $R_m$  - сопротивление мембраны. Величина  $1/W_0$  соответствует пересечению фильтровальной зависимости с осью ординат  $t/q$ .

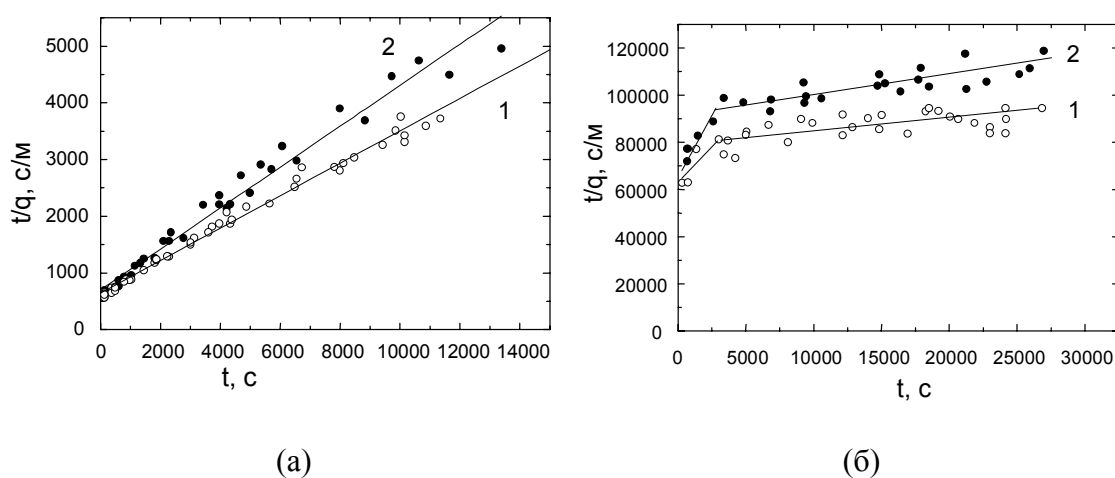


Рис. 3. Зависимость обратной скорости фильтрования  $t/q$  водопроводной от времени  $t$ : (а) – микрофильтрация, (б) – ультрафильтрация. 1 – фильтрование с префильтром ПТТФ; 2 – фильтрование без предочистки.

Для ультрафильтрационной мембраны также можно принять фильтрование с постепенным закупориванием пор за исключением начального периода формирования осадка. Как следует из экспериментов, не наблюдается существенного влияния предочистки на  $W_0$ , а следовательно и сопротивление исследованных мембран,  $R_m$ . Это подтверждает предположение об определяющей роли собственно осадка загрязнений осаждающегося на мембрану.



Уменьшение тангенса угла наклона фильтрационных зависимостей с предочисткой воды, рис. 3, соответствующего величине  $k$  в уравнении (2), свидетельствует о снижении общего сопротивления осадка. Снижение сопротивление осадка связано с перераспределением соотношения частиц крупной и мелкой фракций за счет предварительного фильтрования в пользу мелких частиц. Если представить осадок как бинарную смесь крупных и мелких частиц, то можно сделать некоторые оценки базируясь на данных о бинарных смесях сферических частиц [10].

Состав осадка при прямом фильтровании водопроводной воды через мембрану: 30% частиц размером  $\sim 4$  микрон и 70% размером  $\sim 0,5$  микрон. При отношении  $D/d$  около 8 пористость смеси составляет  $\varepsilon \approx 0,27 - 0,3$ . Если за счет предварительного фильтрования доля крупных частиц в осадке снизилась до 10 – 20%, то соответственно пористость возрастет до  $\varepsilon \approx 0,34 - 0,35$ .

Оценка проницаемости осадка при уменьшении объемной доли крупных частиц с 30 до 10% в предположении, что осадок представляет собой бинарную смесь сферических частей размером 4 и 0,5 микрон предсказывает увеличение проницаемости на 20%, что хорошо коррелирует с данными полученными на ультрафильтрационной мембране.

Высокий прирост производительности для микрофильтрационной мембраны по-видимому связан с отсутствием область стабилизации толщины осадка из-за более низкой истинной скорости тангенциального потока и более чем на порядок высокой скорости фильтрования в сравнении с ультрафильтрацией. Оценка коэффициента  $k$  в уравнении (2), связанного с гидравлического сопротивлением осадка, также дает величину прироста проницаемости при предфильтрации в 20 – 25%.

## **Выводы**

На основании экспериментального исследования процесса фильтрации с образованием осадка на ультрафильтрационной мембране сделаны следующие выводы:

Полученные результаты свидетельствуют о росте производительности процесса мембранного разделения и увеличения срока службы мембран за счет снижения количества взвешенных веществ попадающих на мембрану.

Выигрыш в производительности составил для ультрафильтрационной мембраны 15 – 20%, для микрофильтрационной мембраны – соответственно 50 – 150%.

Выбранный фильтровальный материал ПТТФ можно использовать в качестве префильтра в системах тонкой очистки водопроводной воды, что позволяет понизить индекс заиливания воды поступающей в мембранную ячейку с 4 до 3,5.

#### Литература

1. Брок Т. Мембранная фильтрация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 464 с.
2. Пилипенко А.Т., Вахнин И.Г., Максин В.И., Развитие методов опреснения вод // Химия и технология воды, т. 13, 8, 1991, - С. 693-727.
3. Гончарук В.В. и др. // Научные и прикладные аспекты подготовки питьевой воды / Химия и технология воды. – 1992. - 7. – с.506-525.
4. Обработка воды обратным осмосом и ультрафильтрацией / Ясминов А.А., Орлов А.К., Карелин Ф.Н., Рапопорт Я.Д. - М.: Стройиздат, 1978 - 121 с.
5. Summerford, K., Quartermaine, B. The importance of pretreatment for RO systems // Water Conditioning and Purification - 1998. - Vol. 40, 1, - pp. 84-87.
6. Applied Membranes, Inc., 1992 Catalog - Components & Services, San Marcos, CA, USA, 1992, - 96 p.
7. The liquid filtration manual, Vol. 1. Part III. Filters, The McIlvaine Co., Northbrook, IL, USA, 1993. - p. 266.

8. ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая", М: Издательство стандартов. – 1984. – С. 3-5.
9. Вегера А.И., Исследование возможности применения трикотажных фильтро-тканей для предфильтрации в мембранных процессах очистки воды. Материалы IV научной конференции студентов и аспирантов Беларуси, Мн.: Белгосуниверситет, 1999.
10. Yu, A.B., Zou, R.P., Standish, N. Modifying the linear packing model for predicting the porosity of nonspherical particle mixtures // Ind.Eng.Chem.Res. - 1996. - Vol. 35, 10, - pp. 3730-3741.
11. MacDonald, M.J., и др. A generalized Blake-Kozeny equation for multisized spherical particles // AIChE Journal - 1991. - Vol. 37, 10, - pp. 1583-1588.
12. Abe, E., Hirose, H. Porosity estimation of a mixed cake in body filtration // Journal of Chem.Eng.Japan - 1982. - Vol. 15, 6, - pp. 490-493.
13. Ельшин А.И., Вегера А.И., Волков В.К., Жаркова О.Н. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных фильтроматериалов, Вести ПГУ, 1999
14. ТУ 40 БССР 02-53-90. Полотно трикотажное техническое фильтровальное (ПТТФ).- Вводятся впервые: Введ. 01.01.91. Минск: Белстандарт, 1989. – 10 с. Группа М 41.
15. Ельшин А.И., Путинцев С.А., Петрова В.А. и др. Применение трикотажных материалов в качестве фильтровальных элементов для разделения суспензий // Химическая промышленность, 1989, 2, с. 137-138.
16. Yelshin, A. Development of knitted fabric filter media for liquid filtration // Filtration and Separation - 1990. - Vol. 27, 3, - pp. 169-170.
17. Исследование фильтрационных свойств лавсановых трикотажных полотен при разделении ряда суспензий в производстве мономеров / И.С. Зах, В.А. Петрова, М. А. Коган, Л.Н. Антонова, А.В. Агапова, Л.Н. Баталина, Т.В. Владимирова, Н.В. Войтова // Синтез и технология мономеров. Сб. научн. трудов ВНИПИМ. – М.: НИИТЭИХИМ, 1990. – С. 121-125.

18. Коган М.А., Петрова В.А., Диско О.В., Ельшин А.И. Трикотажные фильтровальные материалы для суспензий // Текстильные материалы технического назначения и опыт их применения в народном хозяйстве: Тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. конф. – М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1991. – С. 34.
19. Коган М.А., Петрова В.А. Исследование свойств трикотажных фильтровальных материалов // Совершенствование технологических процессов, оборудования и организации производства в легкой промышленности и машиностроении. Сб. статей в 2 частях. Часть 1. – Минск: Універсітэцкае, 1994. – С. 80-82.
20. А.с. 1378893 (СССР). МКИ В 01 D 39/08. Фильтровальный материал для суспензий / В.А. Петрова, М.А.Коган, А.И.Ельшин.- Заявл. 04.06.83. Бюл. N 9, 1988.
21. А.с. 1503863 (СССР). МКИ В 01 D 3/32. Фильтрующий материал для суспензий / В.А. Петрова, М.А.Коган, А.И.Ельшин и др.- Заявл. 10.11.87. Бюл. N 32, 1989.
22. Pure water Handbook, Osmonics, Inc., Minnesota, USA, 1991. - p. 119.
23. Карелин Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом. – М.: Стройиздат, 1988. – 208 с.
24. Mermoz, J.-R., Gin, V. Filtration en protection des membranes d'osmose inverse et d'ultrafiltration // Eau, ind., nuisances. - 1991. - Vol. 146, - pp. 44-47.
25. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
26. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.-368 с.