

УДК 628.169

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА БИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАСТАНИЕ МЕМБРАН

НЕЧИТАЙЛО Н. П.¹, к. т. н., доц.,

НЕСТЕРОВА Е. В.², к. т. н.,

КОСЮК Е. Н.³, асп.,

РЕШЕТНЯК Д. А.⁴, маг.

¹Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_pr@mail.ru

²Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79

³Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: evgeniykosuk1992@gmail.com

⁴Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: dashka_reshetnyak@mail.ru

Аннотация. *Цель статьи* - изучение проблемы микробиологического обрастания поверхности мембранных элементов. Поиск методов решения данной проблемы. *Результаты.* Понимание состава и механизма действия биомассы на поверхность мембранных элементов. *Практическая значимость.* Получение нового метода предотвращения микробиологического обрастания поверхности мембранных элементов.

Ключевые слова: мембрана; микробиология; обеззараживание; обрастание

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА БІОЛОГІЧНЕ ОБРОСТАННЯ МЕМБРАН

НЕЧИТАЙЛО Н. П.¹, к. т. н., доц.,

НЕСТЕРОВА О. В.², к. т. н.,

КОСЮК Е. Н.³, асп.,

РЕШЕТНЯК Д. А.⁴, маг.

¹Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_pr@mail.ru

²Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79.

³Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: evgeniykosuk1992@gmail.com

⁴Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: dashka_reshetnyak@mail.ru

Анотація. *Мета статті* - вивчення проблеми микробиологічного обростання поверхні мембранных елементів. Пошук методів вирішення цієї проблеми. *Результати.* Розуміння складу і механізму дії біомаси на поверхню мембранных елементів. *Практична значимість.* Отримання нового методу запобігання микробиологічного обростання поверхні мембранных елементів.

Ключові слова: мембрана; микробиологія; знезараження; обростання

DEFINITION OF THE MAIN FACTORS AFFECTING THE BIOLOGICAL EXPECTATION OF MEMBRANES

NECHITAYLO N.¹, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,

NESTEROVA E.², Cand. Sc. (Tech.),

KOSYUK E.³, PhD stud.,

RESHETNIAK D.⁴, master's degree.

¹Department of Water-Supply, Water-Diversion and Hydraulics, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskoho str, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_np@mail.ru

²Department of Water-Supply, Water-Diversion and Hydraulics, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskoho str, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79

³Department of Water-Supply, Water-Diversion and Hydraulics, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskoho str, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: evgeniykosuk1992@gmail.com

⁴Department of Water-Supply, Water-Diversion and Hydraulics, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskoho str, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: dashka_reshetnyak@mail.ru

Summary. Purpose. Study of the microbial fouling problem of the membrane elements surface. Search for solutions to this problem. **Results.** Understanding the composition and mechanism of biomass effect on the surface of membrane elements. **Practical significance.** Obtaining a new method for preventing microbial fouling of the membrane elements surface.

Keywords: *membrane; microbiology; disinfection; fouling*

Введение. В процессе экспериментальных исследований установлено, что при отсутствии первичной обработки воды хлорированием на поверхности мембраны активно развивается слой отложений биологического происхождения. Это можно объяснить тем, что извлекаемые вещества либо же сами являются биомассой, либо являются питательной средой.

Биологическое обрастание авторы [1] назвали «ахиллесовой пятой» мембранных методов обработки. Потому, что микроорганизмы способны к размножению в течение длительного времени, используя биоразлагаемые примеси из питательной воды, даже если их удаление происходит более чем на 99 % на предыдущих стадиях обработки.

Биозагрязнения могут обуславливать следующие неблагоприятные факторы воздействия на мембранные системы [2 - 6];

- снижение трансмембранного потока в связи с формированием биопленки, которая снижает проницаемость поверхности мембраны;

- увеличение перепада давления на мембране, что требует увеличения давления с питающей стороны;

- мембранная биодеградация, вызванная кислой средой в результате образования побочных продуктов жизнедеятельности биопленки на поверхности мембраны. Например, мембраны из ацетатцеллюлозы наиболее восприимчивы к биодеградации;

- увеличение проницаемости задерживаемых веществ и снижение качества воды в

связи с накоплением в биопленке на поверхности мембраны загрязнений, что увеличивает степень концентрационной поляризации;

- увеличение энергозатрат на продавливание воды сквозь мембрану.

Четкое представление о бактериальном развитии и образовании пленки на поверхности мембраны позволяет обеспечить бесперебойную работу системы обработки природных и сточных вод с минимальным загрязнением поверхности мембраны, а также позволяет исключить необратимые модификации мембран. Бактериальные загрязнения поверхности (например, формирование биопленки) можно разделить на три этапа: транспорт организмов на поверхности, закрепление на поверхности мембраны и последующее развитие микроорганизмов.

Конструкция мембранных установок довольно сложна, имеет много развитых поверхностей, щелей и застойных зон в ее трубопроводах и аппаратуре. Мембранные элементы, входящие в ее состав, имеют огромную площадь поверхности, которая легко доступна для закрепления и развития микроорганизмов. Именно они являются особенно склонными к биологическому росту.

При проектировании мембранных установок и расчете эффективности их использования в том или ином производстве следует учитывать расходы, которые могут понадобиться для поддержания безопасности воды в микробиологическом

отношении (особенно в производствах, где бактериальное загрязнение является критичным для конечного продукта). Такие примеры найдены в пищевой, медицинской, фармацевтической и электронной отраслях промышленности.

Исследование способов предотвращения биологического обрастания мембран и поиск путей решения.

Наиболее простым и эффективным способом предотвращения роста биопленки на поверхности мембран является постоянный контроль общего микробного числа. При контроле и регистрации уровня микробиологических загрязнений в процессе эксплуатации мембранных установок необходимо отслеживать тенденции изменения микробиологического качества воды, как в очищенной, так и в исходной воде.

В зависимости от источника водоснабжения и времени года в исходной воде могут наблюдаться сезонные колебания уровня ее загрязненности. Поэтому перед проектированием мембранных установок по возможности следует проверять качество исходной воды в течение года. Однако для поверхностных источников водопользования данная методика не является определяющей.

Бактериальный рост часто зависит от обстоятельств, которые сложно предсказать или предусмотреть, и здесь очень важно определить, существует ли тенденция к увеличению уровня загрязнения. Также постоянный контроль качества воды на микробиологические показатели не всегда возможно осуществить в сроки, обеспечивающие эксплуатацию мембран, не приводящую к необратимым процессам.

Так, воспользовавшись данными, изложенными в работах [6; 7], можно с уверенностью сказать, что накопление загрязнений за счет прироста биомассы становится весьма значительным уже через 30–40 часов, а через 50 часов работы установки носит основной характер загрязнения. Соответственно, создание модифицированного слоя с бактериостатическими или биоцидными

свойствами позволит в значительной степени продлить цикл между химическими промывками мембранных установок.

Способ, которым сейчас решается данная проблема, – это периодическое обеззараживание мембраны при обратной промывке раствором гипохлорита натрия. Однако, как видно из данных рисунка, прирост биомассы начинается уже в первые часы работы, а значит, происходит блокирование пор мембраны.

Для предотвращения биозагрязнения мембраны и роста биомассы на ее поверхности необходимо понимать механизмы роста и крепления микроорганизмов к мембранному полотну.

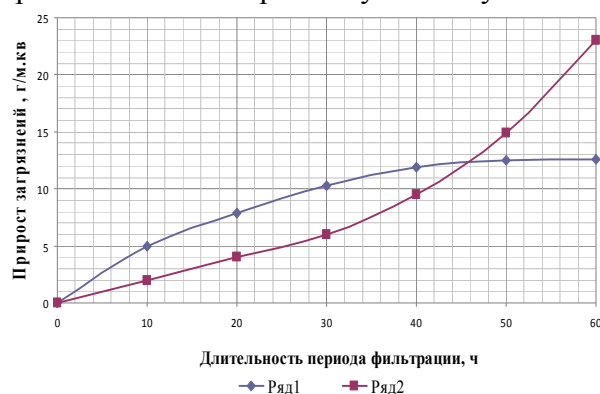


Рис. Прирост загрязнений при очистке природных вод на поверхности мембраны
ряд 1 – прирост загрязнений на поверхности мембраны, обусловленный органическими и неорганическими веществами; ряд 2 – прирост загрязнений на поверхности мембраны за счет роста биомассы на ее поверхности и присоединения из источника

В работе Flemming Н.-С. с соавторами показано, что образование биопленки происходит в течение трех дней. Этого времени достаточно, чтобы полностью покрыть площадь мембраны биопленкой за счет биоадгезии. Исследования [8, 9] показали, что первые необратимые процессы прикрепления клеток микроорганизмов начинаются уже через несколько минут после поступления исходной воды на мембрану. Определено, что бактериальные пленки вносят более существенный вклад в прирост сопротивления мембраны по сравнению с концентрационной поляризацией, обусловленной другими загрязняющими веществами, входящими в состав исходной

воды. Установлено, что микроорганизмы рода *Pseudomonas* быстро закрепляются на поверхности мембраны. *Pseudomonas aeruginosa* - грамотрицательная подвижная бактерия палочковидной формы, которая является облигатным (строгим) аэробом, имеет размеры 0,5 - 0,8 мкм в толщину и 1,5 - 3 мкм в длину, широко распространена в природе.

Она может встречаться как в биопленке, прикрепленной к какой-либо поверхности или субстанции, так и в планктонной форме, т. е. в виде отдельной бактерии, передвигающейся с помощью своего полярного жгутика. Работы по исследованию формирования биопленки на обратноосмотических мембранах были проведены М. Herzberg and M. Elimelech [10]. В результате экспериментальных исследований установлено, что в примембранном слое развитие синегнойной палочки происходит значительно интенсивней из-за высокой концентрации белка и возможности закрепления микроорганизмов на поверхности мембраны.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что данная палочка может успешно размножаться на мембранах ввиду того, что из природных вод поступает достаточное количество питательных веществ. При недостатке питания развитие бактерий происходит значительно медленней, и биопленка образуется не на всей поверхности мембраны. Данные наблюдения подтверждают экспериментальные исследования, полученные в работах [7, 10].

Flemming Н.-С., и Schaule G. [7] исследовали развитие биологической пленки на различных материалах мембран. На мембранах из полиэфира карбамида наблюдалось торможение развития биопленки, в отличие от мембран из полиамида, полисульфона и полиэфирсульфона.

В работах [13-15] проведены исследования по модификации поверхностей ацетатцеллюлозных мембран для обеспечения бактерицидных свойств.

Впервые разработан метод получения ацетатцеллюлозных мембран с антибактериальными свойствами путем непосредственного введения бактерицидных веществ в формовочный раствор. Авторами разработаны методы химической иммобилизации на поверхности ацетатцеллюлозных и целлюлозных промышленных мембран бактерицидных веществ разного химического строения. Также показана возможность регулирования разделительных свойств мембран за счет их модификации бактерицидными веществами разного химического строения.

Крепление микробных клеток к поверхности мембраны является первым шагом к биообрастанию, что приводит к образованию слоя биопленки. Биопленки могут содержать популяции различных видов микроорганизмов (например, бактерий, водорослей, простейших и грибов). Начальная стадия крепления микроорганизмов обуславливается электрокинетическими и гидрофобными силами [16], и, как правило, за ней следует рост клеток и размножение за счет растворённых питательных веществ в исходной воде или адсорбированных органических веществ на поверхности мембраны [17].

Внеклеточные полимерные вещества (EPS), выделяемые микроорганизмами, служат якорем клетки к субстрату и в дальнейшем способны стимулировать дополнительную микробную колонизацию поверхности мембраны [17]. Внеклеточные полимерные вещества, выделяемые бактериями, это, в основном, высокомолекулярные соединения, состоящие из различных органических веществ, таких как полисахариды, белки, нуклеиновые кислоты и жиры. Данные вещества соответственно делают биоплёнку устойчивой к механическим воздействиям.

Внеклеточные полимерные вещества, агрегируясь на поверхности мембраны, создают слой геля, который служит не только сшивающим веществом, но и питательной средой для бактерий. Данные вещества проникают на разную глубину в

био пленку, которая также является дополнительной средой, обуславливающей осадкообразование на поверхности полимера.

В качестве питания биопленка может использовать как низкомолекулярные соединения с массой менее 1 кДа, так и высокомолекулярные соединения с массой более 1 кДа.

Внеклеточные полимерные вещества, генерируемые биопленкой, делятся на заряженные и неполярные. К заряженным полимерным группам относятся: карбоксильные, фосфорные, сульфгидрильные, фенольные и гидроксильные. Неполярные группы - это ароматические и алифатические белки и гидрофобные участки углеводных цепей [19]. Таким образом, обе группы обуславливают смачивающие и сшивающие характеристики, а значит, они содержат как гидрофильные, так и гидрофобные участки. Гидрофобные части внеклеточных полимеров содействуют селективной адсорбции органических веществ, поступающих из питательной воды [20].

При обработке сточных вод некоторые органические вещества могут адсорбироваться на матрице внеклеточных полимеров, соответственно и гидрофильность / гидрофобность полимерных веществ существенно влияют на общую гидрофобность микробных агрегатов в биореакторах [21]. Белки, углеводы и нуклеиновые кислоты внеклеточных полимеров также вступают в процесс комплексообразования с тяжелыми металлами [22], что дополнительно влечет образование неорганических пленок на поверхности мембраны, а, соответственно, повышает сопротивление и снижает проницаемость.

Крепление микроорганизмов к поверхности мембраны зависит от таких факторов как материал мембраны (субстрат природы) [23], шероховатость поверхности мембраны [24], гидрофобность и поверхностный заряд мембраны [25].

Последовательность образования биопленки включает в себя следующие этапы:

- адсорбцию органических соединений и взвешенных частиц на смоченной поверхности мембраны для формирования пленки;

- перенос микробных клеток к формирующейся пленке из органических и взвешенных веществ;

- прикрепление микробных клеток к поверхности мембраны;

- рост и метаболизм прикрепленных микроорганизмов и развитие биопленки;

- ограничение роста биопленки, возникающее под действием гидродинамических сил сдвига для достижения устойчивого состояния обрастания с увеличением сопротивления мембраны [26].

В свою очередь, после прикрепления к поверхности мембраны и обеспечения достаточного питания микробные клетки начинают продуцировать продукты жизнедеятельности на ее поверхности. Адгезия продуктов жизнедеятельности бактерий в процессе образования гелематрицы на поверхности мембраны зависит от ряда факторов. Это:

- характеристика сцепления внеклеточного полимера продуцированного микробной флорой;

- гибкость, сорбционные, комплексообразующие и ионообменные свойства полимеров;

- адгезионные способности внеклеточных продуктов жизнедеятельности к поверхности мембраны;

- морфология поверхности мембраны;

- (e) диффузия EPS в пористую структуру поверхности и (F) структуры потока вблизи поверхности мембраны [21]. Связывание EPS на поверхности мембраны усиливается течением времени из-за гибкости и сшивки характера EPS.

Согласно исследованиям [27], в большинстве биопленок микроорганизмы составляют меньше 10 % от сухой массы, тогда как матрицы внеклеточных полимеров, которые в основном

производятся организмами самостоятельно, обуславливают более чем 90 % основной массы сформированной биопленки.

В условиях окружающей среды органические соединения углерода обеспечивают питательными веществами, необходимыми для роста и энергоснабжения биомассы, большинство бактерий. Широкий спектр органических соединений, таких как карбоновые кислоты, аминокислоты, белки и углеводы, способствует росту бактерий в водной среде, а, соответственно, и росту биопленки, которая вызывает проблемы в работе мембранных аппаратов, что приводит к засорению подводящего канала, полотна мембраны даже при низких концентрациях - от нескольких миллиграммов в литре [28].

Авторами [28] отмечено, что почти 17 % снижения производительности в течение первых 72 часов работы обусловлено образованием биопленок на поверхности мембраны. В работе [29] показана математическая модель влияния биопленок в процессе обрастания. Показано, что биопленки имеют большее влияние в процессе понижения производительности по сравнению с концентрационной поляризацией.

В последнее время появился ряд работ [32], предлагающий в структуру мембраны встраивать соединения, которые снижают иммобилизацию микроорганизмов на ее поверхности. Авторами предложено решение по иммобилизации ионов цинка в полимерные цепи мембраны, что позволит создавать бактерицидный слой [32].

В работе [33] раскрыт вопрос антибактериальных свойств ультрафильтрационной мембраны, модифицированной оксидом графена с наночастицами серебра. Нанесение такого модифицирующего слоя позволяет придавать мембране устойчивый антимикробный эффект в течение 3–4 суток.

Испытание необрастающей мембраны [34] показало, что гибридный материал полотна, модифицированный HNTs-CS и Ag, проявил хорошую устойчивость против обрастания. Кроме того, антибактериальный

тест показал, что мембрана обладает хорошей антибактериальной активностью и была устойчива против кишечной палочки и золотистого стафилококка на 94,0 % и 92,6 % соответственно.

Традиционно, по рекомендациям производителей, промывку раствором гипохлорита натрия или другим окисляющим биоцидом необходимо производить один раз в 24 часа. Это позволит удалять живую биомассу, а также убирать часть органических загрязнений. Однако стоит отметить, что в процессе развития микроорганизмы выделяют полимеры для крепления к поверхностям, а также белки, полисахариды и другие продукты жизнедеятельности. Также биопленки иммобилизованы на поверхностях мембраны вблизи порового пространства. Этот эффект можно объяснить тем, что поры являются местами оттока растворителя (чистой воды). Загрязненная вода или концентрат, содержащий микробиологические загрязнения и питательный субстрат, накапливаются вблизи оттоков в максимальной концентрации.

Биопленки, образованные на поверхности мембраны, являются одной из стратегий выживания бактерий в окружающей среде [35]. Так, основным структурным компонентом биопленок являются [36] экзополимеры или полисахаридные штаммы. Экзополимеры составляют около 85 % всей массы биопленки. Как известно, данные биопленки устойчивы к дезинфицирующим средствам [37]. По этой причине периодические промывки биоцидными растворами не предотвращают частичную блокировку пор мембран.

Сравнительное изучение влияния биологического обрастания при ин-лайн коагулировании с периодической обработкой озоном, только с коагулированием и без него, представлено в работе Fátima Rojas-Serrano [38]. Тестирование данных методов показало, что наилучший результат обеспечивается только при коагулировании.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Biofouling – the Achille’s heel of membrane processes / H.–C Flemming, T. Griebe, G. Schaule, J. Schmitt, A. Tamachkiarowa // *Desalination*. – 1997. – Vol. 113, iss. 2–3. – P. 215–225.
2. Vrouwenvelder J. S. Diagnosis of fouling problems of NF and RO membrane installations by a quick scan / J. S. Vrouwenvelder, D. van der Kooij // *Desalination*. – 2002. – Vol. 153, iss. 1–3. – P. 121–124.
3. Kramer J. F. The solution to reverse osmosis biofouling / J. F. Kramer, D. A. Tracey // *Proceedings of IDA World Congress on Desalination and Water Use, Abu Dhabi, Saudi Arabia, November 18-24, 1995 / organized by the International Desalination Association (IDA)*. – Abu Dhabi, 1995. – Vol. 4. – P. 33–44.
4. Abd El Aleem F. A. Biofouling problems in membrane processes for water desalination and reuse in Saudi Arabia / F. A. Abd El Aleem, K. A. Al-Sugair, M. I. Alamad. *Int. Biodeterior // International Biodeterioration & Biodegradation*. – 1998. – Vol. 41, iss. 1. – P. 19–23.
5. Ridgway H. F. Microbial adhesion and biofouling of reverse osmosis membranes / Ridgway H. F. // *Osmosis Technology: Application for High Pure Water Production / ed. Bipin S. Parekh*. – New York : Marcel Dekker Inc, 1988. – P. 429–481.
6. Первов А. Г. Влияние биологического загрязнения на работу обратноосмотических и ультрафильтрационных мембранных элементов / А. Г. Первов, А. П. Андрианов, Э. А. Телитченко. // *Мембраны. Критические технологии*. – 2004. – № 1 (21). – С. 3–17.
7. Бойко Н. И. Применение мембранных технологий в очистке / Бойко Н. И., Одарюк В. А., Сафонов А. В. // *Технологии гражданской безопасности*. – 2014. – Т. 11, № 2. – 67–69 с.
8. Баромембранные методы водоподготовки // *Тепловікі. Енциклопедія опотлення*. – Режим доступа: <http://ru.teplowiki.org/wiki>.
9. Кеммер Ф.Н. Книга Налко о воде / Кеммер Ф.Н. , 2-е изд. / Изд. McGraw-Hill Book Company, 2007. – 503-516 с.
10. Федоренко В. И. Ингибирование осадкообразования в установках обратного осмоса/ В.И. Федоренко // *Мембраны. Критические технологии*. – 2003. – № 2 (18). – 23–30 с.
11. Орестов Є. О. Фізико-хімічні основи дії інгібіторів флоумінг мембран зворотного осмосу та шляхи їхнього оптимального використання / Орестов Є. О., Мітченко Т. Є. // *Вода і водоочисні технології*. – 2013. – № 2 (12).
12. Нечитайло Н. П. Использование полиакриловой кислоты для предотвращения осадкообразования в баромембранных процессах / Н. П. Нечитайло, Е. Н. Косюк, Д. А. Решетняк // *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры*. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 92 : Серия : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. – С. 93–98.

REFERENCES

1. Flemming H.–C., Griebe T., Schaule G., Schmitt J. and Tamachkiarowa A. *Biofouling – the Achille’s heel of membrane processes*. *Desalination*. 1997, vol. 113, iss. 2–3, pp. 215–225.
2. Vrouwenvelder J.S. and D. van der Kooij *Diagnosis of fouling problems of NF and RO membrane installations by a quick scan*. *Desalination*. 2002, vol. 153, iss. 1–3, pp. 121–124.
3. Kramer J.F. and Tracey D.A. *The solution to reverse osmosis biofouling*. *Proceedings of IDA World Congress on Desalination and Water Use, Abu Dhabi, Saudi Arabia, November 18-24, 1995*, vol. 4, pp. 33–44.
4. Abd El Aleem F. A., Al-Sugair K.A. and Alamad. M.I. *Biofouling problems in membrane processes for water desalination and reuse in Saudi Arabia*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1998, vol. 41, iss. 1, pp. 19–23.
5. Ridgway H.F., ed. Bipin S.Parekh *Microbial adhesion and biofouling of reverse osmosis membranes*. *Osmosis Technology: Application for High Pure Water Production*. New York: Marcel Dekker Inc, 1988, pp. 429–481.
6. Pervov A.G. Andrianov A.P. and Telitchenko Ye.A. *Vliyanie biologicheskogo zagryazneniya na rabotu obratnoosmoticheskikh i ul'trafil'tracionnykh membrannykh elementov* [Impact of biological contamination on the operation of reverse osmosis and ultrafiltration membrane elements]. *Membrany. Kriticheskie tehnologii* [Membranes. Critical Technologies]. 2004, no. 1 (21), pp. 3–17. (in Russian).
7. Boyko N.I., Odaryuk V.A. and Safonov A.V. *Primenenie membrannykh texnologij v ochistke* [Application of membrane technologies in purification]. *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil Security Technologies]. 2014, vol. 1, no. 2, pp. 67–69. (in Russian).
8. *Baromembrannyye metody vodopodgotovki* [Baromembrane methods of water treatment]. *Teplowiki. Enciklopediya opotleniya* [Teplowiki. Encyclopedia of heating]. Available at: <http://ru.teplowiki.org/wiki>. (in Russian).
9. Kemmer F.N. *Kniga Nalko o vode* [Nalko's book about water]. McGraw-Hill Book Company, 2007, pp. 503-516. (in Russian).
10. Fedorenko. *Inhibirovanie osadkoobrazovaniya v ustanovkah obratnogo osmosa* [Inhibition of sedimentation in reverse osmosis plants]. *Membrany. Kriticheskie tehnologii* [Membranes. Critical Technologies]. 2003, no. 2 (18),

pp. 23-30. (in Russian).

11. Orestov E.O. and Mitchenko T.E. *Fizyko-khimichni osnovy dii inhibitoriv flouming membran zvorotnoho osmosu ta shliakhy yikhnoho optimalnoho vykorystannia* [Physico-chemical basis of the flouming inhibitors of reverse osmosis membranes and the ways of their optimal use]. *Voda i vodoochysni tekhnolohii* [Water and water treatment technology]. 2013, no. 2 (12). (in Ukrainian).
12. Nechitajlo N.P., Kosyuk E.N. and Reshetnyak D.A. *Ispolzovanie poliakrilovoj kisloty dlya predotvrashcheniya osadkoobrazovaniya v baromembrannykh procesax* [The use of polyacrylic acid to prevent precipitation in baromembrane processes]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Seriya: Energetika, ekologiya, komp'yuternye tekhnologii v stroitel'stve* [Series: Energetics, ecology, computer technology in construction]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2016, iss. 92, pp. 93–98. (in Russian).

Рецензент: Дерев'янку В. М., д-р т. н., проф.

Надійшла до редколегії: 13.03.2017 р. Прийнята до друку: 16.03.2017 р