

УДК 628.169

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.62.93

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА БИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАСТАНИЕ МЕМБРАН

НЕЧИТАЙЛО Н. П.¹, канд. техн. наук, доц.,

НЕСТЕРОВА Е. В.², канд. техн. наук,

КОСЮК Е. Н.³, аспирант,

РЕШЕТНЯК Д. А.⁴, магистр

¹Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_pr@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

²Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

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

Аннотация. *Цель исследования* - 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, канд. техн. наук, доц.,

НЕСТЕРОВА О. В.², канд. техн. наук,

КОСЮК Е. Н.³, аспірант.,

РЕШЕТНЯК Д. А.⁴, магистр

¹ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідраліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_pr@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

² Кафедра водопостачання, водовідведення та гідраліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

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

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

Анотація. *Мета дослідження* - вивчення проблеми микробиологічного обростання поверхні мембранных елементів. Пошук методів вирішення даної 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; микробиология; знезараження; обростання

DEFINITION OF THE MAIN FACTORS AFFECTING THE BIOLOGICAL EXPECTATION OF MEMBRANES

NECHITAYLO N. P.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

NESTEROVA E. V.¹, Cand. Sc. (Tech.),

KOSYUK E. N., *postgraduate*,
RESHETNIAK D. A., *master's degree*.

¹Department of water-supply, water-diversion and hydraulics, State higher educational establishment the «Prydniprovsk State Academy of Civil and Architecture», street of Chernyshevskogo, 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: n_np@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

²Department of water-supply, water-diversion and hydraulics, State higher educational establishment the «Prydniprovsk State Academy of Civil and Architecture», street of Chernyshevskogo, 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

³Department of water-supply, water-diversion and hydraulics, State higher educational establishment the «Prydniprovsk State Academy of Civil and Architecture», street of Chernyshevskogo, 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: evgeniykosuk1992@gmail.com

⁴Department of water-supply, water-diversion and hydraulics, State higher educational establishment the the «Prydniprovsk State Academy of Civil and Architecture», street of Chernyshevskogo, 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-79, e-mail: dashka_reshetnyak@mail.ru

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

Keywords: *membrane; microbiology; disinfection; fouling*

Введение. В процессе экспериментальных исследований установлено, что в случае отсутствия 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 удаляют 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 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 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 воды безопасной 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 как очищенной, так и исходной воды. 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 проверить 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.

В работе Н.-С. Flemming с соавторами [1] 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.

Получено, 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 – это грамотрицательная подвижная бактерия палочковидной формы, является облигатным (строгим) аэробом, имеет размеры 0,5-0,8 мкм в толщину и 1,5-3 мкм в длину, широко распространена в природе.

Эта бактерия 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 [8]. 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.

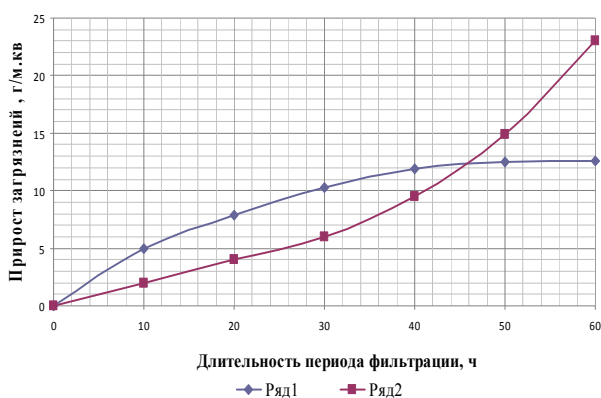


Рис. Прирост загрязнений при очистке природных вод на поверхности мембраны: ряд 1 – прирост загрязнений на поверхности мембраны, обусловленный органическими и неорганическими веществами; ряд 2 – прирост загрязнений на поверхности мембраны за счет роста биомассы на ее поверхности и присоединения из источника

Из вышесказанного можно сделать вывод, что данная палочка может успешно размножаться на мембранах из-за 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].

Н.-С. Flemming, и др. [1] 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 [1-5] 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 крепление микроорганизмов обуславливается электрокинетическими и гидрофобными силами [6] 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 [7].

Внеклеточные полимерные вещества (EPS), выделяемые микроорганизмами, служат якорем клетки к субстрату и в дальнейшем в состоянии стимулировать дополнительную микробную колонизацию поверхности мембраны [7]. 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 биопленку, 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. 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 [10].

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 [11]. Белки, углеводы и нуклеиновые кислоты внеклеточных полимеров также вступают в процесс комплексообразования с тяжелыми металлами [9], 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), шероховатость поверхности мембраны, гидрофобность и поверхностный заряд мембраны.

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 [4].

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 гелевой матрицы на поверхности мембраны зависит от ряда факторов:

- 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;

- (е) диффузия EPS в пористую структуру поверхности и (F) структуры потока вблизи поверхности мембраны [3]. Связывание EPS на поверхности мембраны усиливается течением времени из-за гибкости и сшивки характера EPS.

Согласно исследованиям [5], 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 [12].

Авторами [12] отмечено, что порядка 17 % снижения производительности в течение первых 72 часов работы обусловлено образованием биопленок на поверхности мембраны. В работе 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 [12], 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 [10].

В работе [11] 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 [3] 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 1 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, - это одна из стратегий выживания бактерий в окружающей среде [8]. Так, основным структурным компонентом биопленок являются экзополимеры или полисахаридные штаммы. Экзополимеры составляют около 85 % всей массы биопленки. Как известно, данные биопленки устойчивы к дезинфицирующим средствам [8]. 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 наилучший результат обеспечивается только
работе Fátima Rojas-Serrano [38]. при коагулировании.
Тестирование данных методов показало, что

СПИСОК ИСПОЛЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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 // *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. Adhesion of waste water bacteria to reverse osmosis membranes / S. B. S. Ghayeni, P. J. Beatson, R. P. Schncider, A. G. Fane // *Journal of Membrane Science*. – 1998. – Vol. 138, iss. 1. – P. 29–42.
8. Herzberg M. Physiology and genetic traits of reverse osmosis membrane biofilms: A case study with *Pseudomonas aeruginosa* / M. Herzberg, M. Elimelech // *The ISME Journal*. – 2008. – Vol. 2. – P. 180–194.
9. Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids / B. Bendinger, H. H. M. Rijnaarts, L. Altendorf, A. J. B. Zehnder // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1993. – Vol. 59. , iss. 11. – P. 3977–3977.
10. Spath R. Sorption properties of biofilms / R. Späth, H.–C. Flemming, S. Wuertz // *Water Science and Technology*. – 1998. – Vol. 37, iss. 4–5. – P. 207–210.
11. Microbial fouling of reverse-osmosis membranes used in advanced wastewater treatment technology: chemical, bacteriological, and ultrastructural analyses / H. F. Ridgway, A. Kelly, C. Justice, B. H. Olson // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1983. – Vol. 45, iss. 3. – P. 1066–1084.
12. Biofouling potential of various NF membranes with respect to bacteria and their soluble microbial products (SMP): Characterization, flux decline, and transport parameters / N. Park, K. Boksoon, I. S. Kim, C. Jaeweon // *Journal of Membrane Science*. – 2005. – Vol. 258, iss. 1–2. – P. 43–54.

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. Kooij D. van der 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, organized by the International Desalination Association (IDA)*. Abu Dhabi, 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 obratnoosmoticheskix i ul'trafil'tracionnyx membrannyx elementov [Influence of biological pollution on the work of reverse osmosis and ultrafiltration membrane elements]. *Membrany. Kriticheskie tehnologii [Membranes. Critical Technologies]*. 2004, no. 1 (21), pp. 3–17. (in Russian).
7. Ghayeni S.B.S., Beatson P.J., Schncider R.P. and Fane A.G. Adhesion of waste water bacteria to reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*. 1998, vol. 138, iss. 1, pp. 29–42.
8. Herzberg M. and Elimelech M. Physiology and genetic traits of reverse osmosis membrane biofilms: A case study with *Pseudomonas aeruginosa*. *The ISME Journal*. 2008, vol. 2, pp. 180–194.

9. Bendinger B., Rijnaarts H.H.M., Altendorf L. and Zehnder A.J.B. Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids. *Applied and Environmental Microbiology*. 1993, vol. 59, iss. 11, pp. 937–3977.
10. Spath R., Flemming H.-C. and Wuertz S. Sorption properties of biofilms. *Water Science and Technology*. 1998, vol. 37, iss. 4–5, pp. 207–210.
11. Ridgway H.F., Kelly A., Justice C. and Olson B.H. Microbial fouling of reverse-osmosis membranes used in advanced wastewater treatment technology: chemical, bacteriological, and ultrastructural analyses. *Applied and Environmental Microbiology*. 1983, vol. 45, iss. 3, pp. 1066–1084.
12. Park N., Boksoon K. and Kim I.S. and Jaeweon C. Biofouling potential of various NF membranes with respect to bacteria and their soluble microbial products (SMP): Characterization, flux decline, and transport. *Journal of Membrane Science*. 2005, vol. 258, iss. 1–2, pp. 43–54.

Рецензент: Дерев'янка В. М., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 26.12.2017 р.