УДК 628.3

© Л. И. Цветкова, д-р биол. наук, профессор

© А. М. Телятникова, аспирант

© А. Я. Феськова, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: tsv_liudmila@mail.ru, sik3000@list.ru,

alinafeskova@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-182-188

© L. I. Tsvetkova, Dr. Sci. Biol., Professor

© A. M. Teliatnikova, post-graduate student

© A. Ya. Feskova, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: tsv_liudmila@mail.ru, sik3000@list.ru,

alinafeskova@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛИСТОВЫХ МЕМБРАН

PREDICTING SHEET MEMBRANE PERFORMANCE

Изучен процесс снижения производительности листовых мембран при эксплуатации в режимах мембранного биореактора и доочистки сточных вод. Исследование осуществлялось посредством фильтрации реальных проб сточной жидкости на лабораторной установке. На основании полученных результатов были выявлены математические закономерности снижения производительности мембран в зависимости от поступающей нагрузки по загрязняющим веществам и величин трансмембранного давления. Разработаны рекомендации по расчету продолжительности функционирования мембран. Результаты исследования могут быть применены при проектировании и реконструкции очистных станций для прогнозной оценки целесообразности применения мембранных установок.

Ключевые слова: листовые мембраны, ультрафильтрационные мембраны, доочистка сточных вод, биологическая очистка, мембранный биореактор, производительность мембран, мембранное загрязнение.

The article presents the results of the study investigating the process of reducing the performance of sheet membranes during operation in membrane bioreactor mode and post-treatment of wastewater mode. The study was carried out by means of filtering real samples of wastewater at the laboratory installation. Basing on the results obtained, there were revealed mathematical regularities witnessing the decrease in membrane productivity depending on the incoming load of pollutants and the level of trans-membrane pressure. The authors have worked out some recommendations for calculating the duration of membrane functioning. The results of the study can be applied in the design and reconstruction of treatment plants to predict the appropriateness of using the membrane installations.

Keywords: sheet membranes, ultra-filtration membranes, post-treatment of wastewater, biological treatment, membrane bioreactor, membrane productivity, membrane contamination.

Возможность достижения глубочайшей степени очистки сточных вод уже многие годы обращает пристальное внимание множества исследователей на процессы и проблемы мембранной фильтрации [1–4]. По статистике основной сложностью применения данного метода является загрязнение и забивание пор [5]. Важно отметить, что для фильтрации сточной жидкости применяются ультрафильтрационные мембраны (UF) пористостью от 2 до 50 нм и микрофильтрационные (MF) с размером пор более 50 нм [6, 7]. При этом по своему размеру поры в мембранном теле не однородны. Так, на рис. 1 показаны снимок поверхности мембраны с условным диаме-

тром пор 0,23 мкм и кривая рассеяния размеров пористых элементов.

Кроме того, фильтрация через мембранные элементы может выполняться хроническим и циклическим образом. Выбранный тип фильтрации определяет степень забивания пор и возможное время работы элемента. Так, при хронической фильтрации периодическое удаление загрязнений с поверхности не осуществляется (рис. 2). В таком случае можно выделить три основных этапа работы мембраны: накопление осадка, фильтрация через слой осадка, затухание фильтрации. В конечном счете производительность мембран q_s станет равна нулю. Важно

Рис. 1. Микрофильтрационная мембрана: а — снимок поверхности; б — график рассеяния величины ее пор¹

¹ Технический справочник по обработке воды: в 2 т. / пер. с фр. СПб.: Новый журнал, 2007. Т. 1. 774 с.

отметить, что восстановить мембрану из подобного состояния достаточно сложно даже при помощи долговременной регенерации в кислотных и щелочных растворах [8]. Именно по этой причине применение подобного подхода к фильтрации крайне нежелательно. При невозможности избежать подобного режима эксплуатации рекомендуется не допускать эксплуатацию мембран с величиной q_s более чем на 50 % меньше от исходного значения [8].

Более рациональным подходом к работе мембранных установок является применение периодической очистки поверхности посредством аэрации, обратной промывки, вибрации, ультразвука и т. д. [9]. В таком случае график изменения производительности имеет циклический характер (рис. 3), а в работе мембраны выделяют два основных режима: фильтрацию и отмывку.

Рис. 2. Изменение производительности мембраны q_s во времени t в ходе хронического цикла фильтрации при постоянных величинах трансмембранного давления ΔP и температуры t : $0-t_1$ — накопление осадка; t_1-t_2 — фильтрация через слой осадка; t_2-t_3 — затухание фильтрации

Рекомендуемое максимальное снижение q_s для установок, работающих по данному принципу, составляет от 20 до 30 %. Кроме того, важно отметить, что любой вид очистки поверхности от загрязнений не позволяет восстановить производительность мембраны на 100 %. По этой причине аппроксимирующий график изменения расхода фильтрата будет иметь нисходящий характер.

Основными способами применения мембран на канализационных очистных сооружениях к настоящему моменту являются:

1. Использование в комплексе мембранного биореактора (МБР). Установка фильтрующего мембранного элемента возможна как внутри сооружения аэротенка, так и в отдельной технологической емкости после него. В данном случае именно мембранный модуль занимается отделением очищенной воды от ила, заменяя тем самым привычный метод осаждения ила во вторичном отстойнике. Данная технология позволяет значительно сократить размеры сооружений за счет увеличения концентрации активного ила в аэротенке [2, 10, 11]. Также данная технология исключает дальнейший вынос активного ила из сооружения.

2. Применение в режиме доочистки сточных вод (третичная очистка). В таком случае мембранные модули устанавливаются после вторичного отстойника и осуществляют фильтрацию уже очищенной сточной воды, отделяя остаточные примеси взвешенных веществ [12–14].

Рис. 3. Изменение q_s в ходе циклической фильтрации при постоянных величинах трансмембранного давления ΔP и температуры t : 1 — выход фильтрата; 2 — линейная аппроксимация выхода объема фильтрата: 0– τ_1 — фильтрация, τ_1 – τ_2 — отмывка мембраны

Нахождение взвешенных веществ в потоке очищенной воды чаще всего связано с выносом активного ила из вторичных отстойников при их неудовлетворительной работе. Использование метода третичной мембранной очистки чаще всего целесообразно при реконструкции существующих очистных станций, не справляющихся с очисткой воды до требуемых показателей.

Важно понимать, что в конечном счете мембранные установки не обладают такой производительностью, как остальные, используемые в целях доочистки, фильтры, или применяемые для осаждения вторичные отстойники, поэтому необходимость использования данного оборудования должна быть обоснована технологически. Потребность в обосновании применения подобного оборудования подкрепляется и экономической составляющей вопроса. К сожалению, до сих пор мембраны остаются весьма дорогостоящими, а их эксплуатация связана с большими дополнительными затратами.

Для обоснования необходимости применения мембран целесообразно заблаговременно осуществлять прогнозирование снижения их производительности при работе в установленных условиях. Это поможет в дальнейшем подобрать наиболее благоприятный режим работы установки, а также определить и спланировать технологию и частоту проведения очисток и регенераций.

Разработка прогнозных математических зависимостей, а также непосредственное опреде-

ление пропускной способности мембраны в реальных условиях возможны на лабораторных установках. В рамках настоящего исследования была создана лабораторная модель на основе листового фильтрующего элемента (рис. 4). Проведение всех лабораторных испытаний осуществлялось с применением ультрафильтрационной мембраны с размером пор 0,038 мкм. Диаметр фрагмента применяемого листового модуля составлял 2,5 см. Мембрана устанавливалась поверх фильтра прибора и зажималась прижимным устройством. Разработанная установка позволяла проводить опыты в хроническом режиме фильтрации. Регенерация используемого фрагмента мембраны между опытами осуществлялась раствором гипохлорита натрия NaOCl. Местом проведения экспериментов стал объект ГУП «Водоканал Санкт-Петербург» КОС г. Петродворца.

В рамках исследования проводили две основные группы опытов:

1. Фильтрация очищенной сточной воды после вторичного отстойника. Фильтрация осуществляется при величинах трансмембранного давления $\Delta P = 1$ –5 м вод. ст. и концентрациях взвешенных веществ в образцах сточной жидкости $c_{\text{вв}} = 5, 10, 15, 20$ мг/л. Пробы воды для опытов отбираются на выходе из вторичных отстойников. Согласно данным, предоставленным химико-биологической лабораторией очистной станции, концентрация взвешенных веществ после вторичных отстойников составляет 5 мг/л.

Рис. 4. Лабораторная установка с листовым мембранным модулем: а — схема (1 — воронка; 2 — мембрана; 3 — сборник фильтрата; 4 — ресивер; 5 — вакуумметр; 6 — вакуум-насос; В — откачка воздуха); б — реальный вид модели

Получение проб иных концентраций осуществлялось методом глубокого отстаивания исходного образца с удалением части чистой воды.

2. Фильтрация иловой смеси из аэротенка.

Фильтрация выполнялась при величинах трансмембранного давления $\Delta P = 1-5$ м вод. ст. и дозе ила $a_i = 4, 6, 8$ г/л. Пробы иловой воды для опытов отбираются на выходе из аэротенка. Исходная доза ила в сточной воде составляла 4 г/л, получение более концентрированных образцов осуществлялось также методом глубокого отстаивания с дальнейшей проверкой.

Общее время проведения каждого опыта $\tau = 30$ мин. Каждые 5 мин осуществлялась фиксация данных по суммарному объему фильтрата (ΣV) и изменению объема фильтрата за последний промежуток времени (ΔV). Далее определялась величина проницаемости мембраны, л/(м² · ч),

$$q_s = \frac{\sum \Delta V}{\sum \Delta \tau \cdot S}. \quad (1)$$

На рис. 5 представлен общий вид графиков, получаемых на основании опытных результатов для работы мембраны в режиме доочистки (рис. 5, а), работы мембраны в комплексе МБР (рис. 5, б).

Величины средних значений производительности фрагмента мембраны при различных режимах работы и условиях эксплуатации представлены в сводной таблице.

На основании полученных результатов стало возможным формирование математического

аппарата, позволяющего спрогнозировать величину производительности мембраны через 1 ч ее работы.

При работе в режиме доочистки сточных вод

$$q_s^n = \frac{q_s^0}{\left(\frac{c_{\text{вв}}^n}{c_{\text{вв}}^0}\right)^{0,317} \left(\frac{P_0}{P_n}\right)^{0,546}}, \quad (2)$$

где q_s^n — расчетная производительность мембраны при необходимом давлении и концентрации взвешенных веществ, л/(м² · ч); q_s^0 — исходная производительность мембраны (при $\Delta P = 1$ м вод. ст. и $c_{\text{вв}} = 5$ мг/л), л/(м² · ч); $c_{\text{вв}}^0$ — исходная нагрузка по взвешенным веществам, мг/л; $c_{\text{вв}}^n$ — планируемая концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде, мг/л; P_0 — исходное давление, м вод. ст.; P_n — применяемое давление, м вод. ст.

При работе в режиме МБР

$$q_s^n = \frac{q_s^0}{\left(\frac{a_i^n}{a_i^0}\right)^{0,368} \left(\frac{P_0}{P_n}\right)^{0,475}}, \quad (3)$$

где a_i^0 — исходная доза ила в сточной воде, г/л; a_i^n — планируемая доза ила в сточной воде, г/л.

Кроме того, был разработан математический аппарат, позволяющий определить рекомендуемое время продолжительности работы мембраны при различных режимах фильтрации. Как было упомянуто ранее, при хронической фильтрации допускается снижение q_s^n на 50 % от ис-

Средние значения производительности q_s^{cp} мембраны при различных режимах работы

ΔP, м вод. ст.	Режим работы						
	Доочистка сточных вод				МБР		
	$q_s^{\text{cp}}, \text{ л/}(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$						
	$c_{\text{вв}}, \text{ мг/л}$				$a_p, \text{ г/л}$		
1	52,75	45,56	37,17	29,97	23,98	19,18	15,59
2	69,54	53,95	51,55	24,58	25,18	23,98	22,78
3	101,91	83,98	65,94	47,96	37,17	32,37	37,17
4	107,91	89,92	86,32	71,94	39,57	35,97	33,57
5	119,90	119,90	113,90	99,51	41,36	37,17	34,77

ходной величины q_s^0 . В таком случае рекомендуемое время эксплуатации можно рассчитать:

$$\tau = \frac{30}{\left(1 - \frac{q_s^n}{q_s^0}\right)}, \quad (4)$$

где τ — рекомендуемый период работы мембраны для снижения производительности до допустимой величины, мин.

При фильтрации циклического типа рекомендуют максимальное снижение q_s^n на 20 % от исходной величины q_s^0 . В таком случае уравнение для расчета рекомендуемой продолжительности функционирования мембраны между очистками будет иметь вид:

$$\tau = \frac{12}{\left(1 - \frac{q_s^n}{q_s^0}\right)}. \quad (5)$$

Результаты исследования могут быть применены для обоснования целесообразности применения мембранных технологий при проектировании и реконструкции уже существующих станций аэрации. Применение полученных результатов возможно и в ходе пусконаладочных работ очистных станций, например строящейся в настоящее время в п. Молодежное Ленинградской области. Кроме того, представленные рекомендации по расчету времени функционирования могут быть использованы при разработке новых установок, включающих мембранные модули. Важно отметить и возможность применения разработанной методики прогнозирования производительности мембран на лабораторных установках для подготовки рекомендаций в отношении альтернативных видов мембранных элементов (половолоконных, микротрубчатых).

Библиографический список

1. Keppers P., Видякин М. Н., Поляков А. М. Пример реконструкции очистных сооружений с внедрением мембранного биореактора (МБР) III. Некоторые эксплуатационные характеристики // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 5 (29). С. 60–65.
2. Френкель Вал. С. Мембранные технологии: прошлое, настоящее и будущее (на примере Северной Америки) // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 8. С. 48–54.
3. Майборода А. Б., Катраева И. В., Колпаков М. В. Доочистка сточных вод с использованием ультра-

фильтрации // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 12. С. 32–36.

4. Roorda J. H., van der Graaf J. H. J. M. Оптимизация процессов мембранного фильтрования на сооружениях для очистки сточных вод // Вода: технология и экология. 2007. № 4. С. 30–53.

5. Lazarova V., Dauthuille P. Эксплуатационная надежность и воздействие на окружающую среду технологии очистки сточных вод в мембранных биореакторах // Вода и экология: проблемы и решения. 2009. № 2 (39). С. 19–27.

6. Simon J. The MBR book: Principles and Application of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. 1st ed. Elsevier, 2006. 344 p.

7. Карттунен Э. Водоснабжение II / пер. с финск. СПб.: Новый журнал, 2005. 688 с.

8. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А. Мембранные биологические реакторы для глубокой очистки сточных вод. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2017. 64 с.

9. Ключников А. И., Потапов А. И., Полянский К. К. К вопросу регенерации мембран в процессах микро- и ультрафильтрации технологических жидкостей пищевых производств // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2016. Т. 21, № 1. С. 312–315.

10. Мишуков Б. Г., Мурашев С. В. Расчет установок малой производительности для биологической очистки сточных вод с мембранной фильтрацией // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 1. С. 47–51.

11. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А. Использование мембранных технологий в процессах глубокой очистки городских сточных вод // Инновации и инвестиции. 2017. № 11. С. 175–179.

12. Первов А. Г., Смирнов Д. Г., Мотовилова Н. Б. Мембранные технологии для доочистки сточных вод и их повторного использования // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 7. С. 48–52.

13. Кевбрина М. В., Гаврилин А. М., Дорофеев А. Г., Жарков А. В., Козлов М. Н. Мембранные технологии на стадии доочистки коммунальных сточных вод в АО «Мосводоканал» // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2019. № 5 (137). С. 60–63.

14. Губанов Л. Н., Губанов Д. Л., Маслов А. А. Доочистка сточных вод гальванических производств с использованием фильтрационных мембран // Вестник гражданских инженеров. 2005. № 1 (2). С. 63–64.

References

1. Keppers P., Vidyakin M. N., Polyakov A. M. *Primer rekonstruktsii ochistnykh sooruzheniy s vnedreniem membrannogo bioreaktora (MBR) III. Nekotorye ehkspluatatsionnye kharakteristiki* [Example of reconstruction of treatment facilities with the introduction

of membrane bioreactor (ICBM) III. Some performance characteristics]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie – Water Treatment. Water preparation. Water supply*, 2010, no. 5 (29), pp. 60–65.

2. Frenkel' Val. S. *Membrannye tekhnologii: proshloe, nastoyashchee i budushchee (na primere Severnoy Ameriki)* [Membrane technologies: past, present and future (on the example of North America)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2010, no. 8, pp. 48–54.

3. Mayboroda A. B., Katraeva I. V., Kolpakov M. V. *Doochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem ul'trafil'tratsii* [Tertiary treatment of wastewater using UF]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary technique*, 2013, no. 12, pp. 32–36.

4. Roorda J. H., van der Graaf J. H. J. M. *Optimizatsiya protsessov membrannogo fil'trovaniya na sooruzheniyakh dlya ochistki stochnykh vod* [Optimization of membrane filtration processes in wastewater treatment plants]. *Voda: tekhnologiya i ehkologiya – Water: technology and ecology*, 2007, no. 4, pp. 30–53.

5. Lazarova V., Dauthuille P. *Ehkspluatatsionnaya nadezhnost' i vozdeystvie na okruzhayushchuyu sredu tekhnologii ochistki stochnykh vod v membrannykh bioreaktorakh* [Operational reliability and environmental impact of wastewater treatment technologies in membrane bioreactors]. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya – Water and ecology: problems and solutions*, 2009, no. 2 (39), pp. 19–27.

6. Simon J. *The MBR book: Principles and Application of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. 1st ed. Elsevier, 2006, 344 p.

7. Karttunen Eh. *Vodosnabzhenie II* [Water supply II]. Transl. from Finnish. St. Petersburg, Novyy zhurnal Publ., 2005, 688 p.

8. Mishukov B. G., Solov'eva E. A. *Membrannye biologicheskie reaktory dlya glubokoy ochistki stochnykh vod* [Membrane biological reactors for deep waste water treatment]. St. Petersburg, SPbGEhU Publ., 2017, 64 p.

9. Klyuchnikov A. I., Potapov A. I., Polyanskiy K. K. *K voprosu regeneratsii membran v protsessakh mikro- i ul'trafil'tratsii tekhnologicheskikh zhidkostey pishchevykh*

proizvodstv [Regarding the issue of membrane regeneration in the processes of micro-and ultra-filtration of technological liquids of food production]. *Vestnik Tambovskogo un-ta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tambov University. Series: natural and technical sciences*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 312–315.

10. Mishukov B. G., Murashev S. V. *Raschet ustanovok maloy proizvoditel'nosti dlya biologicheskoy ochistki stochnykh vod s membrannoy fil'tratsiyey* [Calculation of low-capacity plants for biological wastewater treatment with membrane filtration]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2017, no. 1, pp. 47–51.

11. Mishukov B. G., Solov'eva E. A. *Ispol'zovanie membrannykh tekhnologiy v protsessakh glubokoy ochistki gorodskikh stochnykh vod* [The use of membrane technologies in the processes of deep treatment of urban wastewater]. *Innovatsii i investitsii – Innovations and investments*, 2017, no. 11, pp. 175–179.

12. Pervov A. G., Smirnov D. G., Motovilova N. B. *Membrannye tekhnologii dlya doochistki stochnykh vod i ikh povtornogo ispol'zovaniya* [Membrane technology for purification and reuse of wastewater]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2009, no. 7, pp. 48–52.

13. Kevbrina M. V., et al. *Membrannye tekhnologii na stadii doochistki kommunal'nykh stochnykh vod v AO «Mosvodokanal»* [Membrane technologies at the stage of post-treatment of municipal wastewater in JSC “Mosvodokanal”]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie – Water treatment. Water preparation. Water supply*, 2019, no. 5 (137), pp. 60–63.

14. Gubanov L. N., Gubanov D. L., Maslov A. A. *Doochistka stochnykh vod gal'vanicheskikh proizvodstv s ispol'zovaniem fil'tratsionnykh membrane* [Post-treatment of waste water of galvanic productions with the use of filtration membranes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2005, no. 1 (2), pp. 63–64.