ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

УДК 628.355

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6

Исследование рабочих характеристик мембранных модулей для очистки сточных вод

Н.А. Макиша

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена работа отдельно расположенного мембранного биореактора, который может быть использован в качестве альтернативы широко применяемым в настоящее время погружным мембранным модулям для станций малой производительности.

Материалы и методы. Исследования проведены в лабораторных условиях с применением ультрафильтрационного мембранного элемента. В качестве исследуемой жидкости использована синтетическая сточная вода, которая по своему составу соответствовала городским сточным водам, с различными концентрациями взвешенных веществ (доза ила). В экспериментах использован мембранный элемент производства компании Raifil (Корея) с капиллярными ультрафильтрационными мембранами. Размер пор мембран — 0,1 мкм. Общая площадь фильтрующей поверхности мембран — 1 м². Данный мембранный модуль обладает стандартными характеристика (размер пор, материал) для ультрафильтрационных мембран, поэтому можно предположить, что полученные в дальнейшем результаты не будут иметь существенных отличий в случае использования ультрафильтрационных мембранных модулей других производителей.

Результаты. Описана разработанная методика оптимизации величин рабочего давления и доз ила, при которых ведется процесс мембранной очистки. Получены значения операционного давления, при котором резко возрастает количество взвешенных веществ в фильтрате, т.е. начинается пропуск взвешенных веществ в фильтрате или пропуск загрязнений. Определены параметры работы установки, при которых возможно добиться наибольшей производительности.

Выводы. Полученные результаты позволяют наметить дальнейшие направления исследования по оптимизации работы мембранных биореакторов (как отдельно стоящих, так и погружных) для нужд очистки сточных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очистка сточных вод, мембранные биореакторы, доза ила, фильтроцикл

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант Президента РФ № МК-519.2019.8).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макиша Н.А. Исследование рабочих характеристик мембранных модулей для очистки сточных вод // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. Вып. 1. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6

Research of performance characteristics of membrane modules for wastewater treatment

Nikolay A. Makisha

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The study focuses on the operation of a standalone membrane bioreactor applicable as an alternative to submerged membrane modules widely used as part of small capacity wastewater treatment facilities.

Materials and methods. An ultra-filtration membrane was used to perform the research in a laboratory environment. The liquid, exposed to research, represented synthetic wastewater, whose composition was similar to the one of urban wastewaters, and it had varied concentrations of suspended solids (MLSS). The membrane element, produced by Raifil (Republic of Korea), that has capillary ultra-filtration membranes, was used in the experiments. The membrane pore size is 1 micron. The total membrane filter area is one square meter. This membrane module has standard characteristics (pore

size, material), typical for ultra-filtration membranes; therefore, we can assume that any further results will not demonstrate any substantial discrepancies, if ultra-filtration membranes made by other manufacturers are used to conduct experiments.

Results. The author describes a methodology for the optimization of pressure and MLSS values used in the process of membrane treatment. The author obtained the pressure values at which the amount of suspended solids in the filtered material shows a sharp rise, which means a slip of suspended solids into the filtrate, or a slip of contaminants. The author also identified the operating parameters that ensure maximal capacity.

Conclusions. These findings help to outline a roadmap for further research into the optimization of membrane bioreactors (both standalone and submerged units) used in wastewater treatment.

KEYWORDS: wastewater treatment, MBR, mixed liquor suspended solids, filter cycle

Acknowledgement. The work was performed with the financial support from the RF Ministry of Science and Higher Education (RF Presidential Grant № MK-519.2019.8).

FOR CITATION: Makisha N.A. Research of performance characteristics of membrane modules for wastewater treatment. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2020; 10(1):6. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития и совершенствования процессов биологической очистки заключаются в улучшении качества удаления биогенных элементов [1]. Это достигается благодаря увеличению времени обработки (в зарубежной литературе используется термин hydraulic retention time) и дозы ила, что ведет к увеличению объема сооружений. Снижение объема сооружений в настоящее время принято осуществлять с применением мембранных биореакторов — илоразделение происходит не во вторичном отстойнике, а с применением мембранных методов и технологий [2].

На эффективность работы мембран оказывает влияние целая группа факторов, но одними из ключевых являются размер пор, доза ила, рабочее давление.

Важно отметить, что в нашей стране исследования по данной теме представлены недостаточно широко [3], поэтому для формирования представления о наиболее перспективных тенденциях развития технологий требуется изучение научных публикаций зарубежных ученых, однако и в них описываются в основном характеристики процесса [4–6]. Вместе с тем значительный научный и практический интерес представляет исследование возможности увеличения эффективности процесса, в том числе за счет снижения капитальных затрат и затрат электроэнергии (как основной составляющей эксплуатационных затрат) [7–9].

В данной статье описана разработанная методика оптимизации величин рабочего давления и дозы ила, при которых ведется процесс мембранной очистки. Важно понимать, что в настоящее время в большинстве случаев в мембранных биореакторах используются погружные мембранные модули, рабочее давление в которых создается с применением вакуум-насосов [10]. Для фильтрования сточных вод применяются мембраны с крупными порами, относящиеся, скорее, к микрофильтрационным, чем

к ультрафильтрационным [11]. Это объясняется как опытом эксплуатации, так и научными основами фильтрования через пористую перегородку. Как известно, чем ниже величина рабочего давления, тем меньше скорость прироста сопротивления осадка, образующегося на мембранах. А чем больше размер пор, тем больше величина удельной проницаемости мембран [12]. Однако с увеличением размеров пор возникает опасность закупорки пор частицами активного ила. Представляет интерес определить оптимальный режим работы мембраны, при котором достигается минимальная величина энергозатрат [13].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Традиционным и наиболее распространенным решением для мембранного биореактора являются мембранные аппараты погружного типа, что требует зачастую устройства дополнительных сооружений или емкостей [14–16]. Однако при реконструкции небольших объектов наиболее целесообразно не нарушать существующую схему и расположение сооружений на площадке, а также их конструкцию, что особо актуально в условиях ограниченных площадей [3, 17]. Таким образом, требуется более детальное изучение вопроса применения решений по модернизации станций с помощью дополнительного мембранного оборудования, которое возможно разместить в непосредственной близости с существующими сооружениями в небольших контейнерах без устройства новых капитальных емкостей [1, 5, 7].

Для повышения эффективности работы мембранного оборудования и увеличения величины удельной производительности представляет интерес исследовать работу мембран при увеличении рабочего давления и сравнить по стоимости капитальных и эксплуатационных затрат эффективность применения такого «сухого» варианта размещения мембранного оборудования.

Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — бак исходной воды; 2 — рабочий насос; 3 — мембранный аппарат; 4 — бак-гидроаккумулятор; 5 — реле давления; 6 — кран; 7 — пробоотборники фильтрата; 8 — бак промывной воды; 9 — пробоотборники промывной воды; 10 — кран байпаса; 11 — бак-гидроаккумулятор для промывки; 12 — манометр

В настоящей работе предпринята попытка изучения работы мембран при различных величинах рабочего давления и концентраций активного ила с целью получения данных об удельной производительности мембран. Задачами этой части исследований было изучение процесса илоразделения (удаление (задержание) взвешенных частиц активного ила из сточной воды) мембранными методами при различных значениях рабочего давления для увеличения производительности мембранных биореакторов, а также определение оптимального диапазона рабочих давлений, при которых возможно предотвращение закупорки мембран и проскока загрязнений в фильтрат.

Эксперименты проводились на лабораторном стенде, схема которого показана на рис. 1.

В экспериментах использовался мембранный элемент производства компании Raifil (Корея) с капиллярными ультрафильтрационными мембранами (рис. 2). Размер пор мембран составляет 0,1 мкм. Общая площадь фильтрующей поверхности мембран — 1 м². Использованный мембранный модуль обладает стандартными характеристика (размер пор, материал) для ультрафильтрационных мембран, поэтому можно предположить, что полученные в дальнейшем результаты не будут иметь существенных отличий в случае использования ультрафильтрационных мембранных модулей других производителей.

Исходная сточная вода (иловая смесь) находится в баке исходной воды 1 (см. рис. 1), откуда с по-

Рис. 2. Мембранный модуль

мощью рабочего насоса 2 подается в мембранный аппарат 3. Для регулирования рабочего давления использовался бак-гидроаккумулятор 4, реле давления 5 и кран байпаса 10, манометр 12. Фильтрат после

мембранного аппарата собирался в пробоотборниках фильтрата 7.

Было решено проводить исследования при следующих величинах рабочего давления в экспериментах: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3 МПа.

Обязательным условием функционирования мембранных модулей является их обратная промывка. Для проведения обратной промывки использовалась деионизированная вода, полученная на установке обратного осмоса. Для проведения промывок исходная промывная вода помещалась в бак промывной воды 8. Переключение баков производилось с помощью шаровых кранов 6. Рабочий насос подавал промывную воду в тракт фильтрата. Сбор промывной воды осуществлялся через тракт исходной воды в пробоотборники промывной воды 9. Переключение трубопроводов проводилось с помощью кранов 6.

Регулирование давления осуществлялось с помощью реле давления 5, крана байпаса 10 и бака-гидроаккумулятора промывной воды 11.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 показаны результаты определения зависимости производительности мембранного аппарата от давления при фильтровании деионизированной воды. На рис. 4 продемонстрирована зависимость концентраций взвешенных веществ в фильтрате от давления, позволяющая определить величину рабочего давления, при которой начинается «проскок» активного ила в фильтрат.

Если проанализировать оба рисунка, то можно прийти к следующим заключениям. При росте давления пропускная способность мембранного элемента увеличивается, что вполне логично, а сама зависимость имеет фактически линейный характер. В то же время видно, что при давлении до 0,2 МПа (20 м вод. ст. = 2 атм = 2 бар) концентрация взвешенных веществ в фильтрате практически неизменна и близка к нулю, соответственно, сохраняется высокая эффективность работы мембранного модуля при давлении 0–0,2 МПа. При росте давления от 0,2 до

Рис. 3. Зависимость производительности мембранного аппарата от давления

Рис. 4. Зависимость концентраций взвешенных веществ в фильтрате от давления

0,25 МПа наблюдается достаточно интенсивное увеличение количества взвешенных веществ в профильтрованной воде, а при давлении свыше 0,25 МПа происходит достаточно резкий скачок. То есть можно говорить о том, что для проведенного эксперимента давление 0,2 МПа является граничным условием эффективной фильтрации через мембранный модуль, после наступления которого происходит интенсивный проскок.

На основании этих данных дальнейший эксперимент решено построить следующим образом. Для более детального изучения особенностей мембранной фильтрации исследования были проведены в диапазоне давлений до 2 МПа, т.е. до граничной величины, при которой наблюдался проскок. В первом приближении решено использовать две величины рабочего давления — 0,2 МПа с целью оценить эффективность работы в предельном состоянии до проскока и 0,05 МПа, т.е. в условиях вакуума (при давлении ниже атмосферного). Использование вакуумного фильтрования характерно для погружных мембранных модулей. Кроме того, требовалось проанализировать влияние другого важного параметра при эксплуатации мембранных биореакторов — дозы ила, или, другими словами, концентрации взвешенных веществ в реакторе. Значение дозы ила трудно переоценить, поскольку она напрямую влияет и на процесс биологической очистки, и на механизм мембранной фильтрации.

Для первичного изучения были взяты три величины дозы ила a_i — 1,6; 2,5 и 7 г/л. Такой выбор обусловлен тем, что в первые две характеристики близки к традиционно используемым в сооружениях биологической очистки городских сточных вод, а третья концентрация характерна для эксплуатации погружных мембранных биореакторов. Наиболее распространенным подходом является применение доз ила в диапазоне 7–12 г/л в погружных биореакторах [14]. Таким образом, исследовались эксплуатационные характеристики отдельно расположенных

мембранных модулей в условиях, близких для традиционных методов очистки, а также в условиях, аналогичных мембранным биореакторам погружного типа.

На рис. 5 представлены зависимости объема фильтрата от продолжительности фильтроцикла. Как видно, наибольший объем фильтрации отмечается при давлении 0,2 МПа и дозах ила 1,6 и 2,5 г/л. Подобный результат ожидаем — при большем давлении обеспечивается больший объем профильтрованной жидкости, а при малых дозах ила сопротивление фильтрации, создаваемое наличием взвешенных веществ, также меньше.

Если сравнить, как себя ведут графики указанных зависимостей для двух упомянутых доз ила при двух рабочих давлениях, то можно отметить, что разница примерно двукратная, т.е. объем профильтрованной воды при давлении 0,2 МПа примерно в два раза больше, чем при давлении 0,05 МПа.

Наименьшая производительность отмечена для обоих рабочих давлений при дозе ила 7 г/л. При этом разница в объеме фильтрата составляет порядка 20 %, что говорит о том, что при подобных дозах ила рабочее давление не имеет настолько решающего значения, как в первых двух случаях.

Если полученные значения представить в виде продолжительности фильтроцикла, то полученные значения приобретают следующий вид (рис. 6, 7). Как видно, при давлении 0,05 МПа рост количества фильтрата при увеличении времени фильтроцикла имеет плавный характер для всех трех доз ила, а при давлении 0,2 МПа плавный характер роста количества фильтрата сохраняется только для дозы ила 7 г/л, а для двух других значений увеличение количества фильтрата при переходе на более длительный фильтроцикл происходит гораздо интенсивнее.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что чем меньше продолжительность фильтроцикла, тем больше оказывается величина общего количества получаемой воды в час. Поэтому для

Рис. 5. Зависимость объема фильтрата от продолжительности фильтроцикла

Рис. 6. Объем фильтрата при различных фильтроциклах (рабочее давление 0,05 МПа)

Рис. 7. Объем фильтрата при различных фильтроциклах (рабочее давление 0,2 МПа)

Рис. 8. Снижение расхода профильтрованной воды в зависимости от времени фильтроцикла ($P = 0,05 \text{ МПа}$)

Рис. 9. Снижение расхода профильтрованной воды в зависимости от времени фильтроцикла ($P = 0,2$ МПа)

дальнейших исследований представляется очень важным и интересным исследовать возможность оптимизации процесса: определить, при каких продолжительностях фильтроцикла и давления можно получить минимальные затраты на очистку воды. Чем чаще проводится промывка (чем меньше продолжительность фильтроцикла), тем больше требуется общий расход воды в час на проведение промывок, и тем меньше оказывается значение «полезной» производительности мембран (разница между полученным количеством фильтрата и израсходованным количеством на проведение промывок).

На рис. 8 и 9 представлены графики снижения количества профильтрованной воды в течение фильтроцикла при рабочем давлении 0,05 и 0,2 МПа соответственно. Как видно, для давления 0,2 МПа характерны большие расходы воды в начале фильтроцикла, что вполне закономерно, однако по мере протекания фильтроцикла при рабочем давлении 0,2 МПа наблюдается гораздо более интенсивное снижение расхода, в результате чего при достижении времени фильтроцикла 4 мин расход профильтрованной воды для выбранных рабочих давлений являлся фактически одинаковым. Это говорит о том, что рабочее давление имеет как прямое, так и обратное влияние на расход профильтрованной воды. Иными словами, увеличение расхода при большем рабочем давлении «компенсируется» более интенсивным обра-

щением и закупоркой, что приводит к торможению скорости и интенсивности фильтрации. Данное обстоятельство говорит о том, что в ходе дальнейших исследований требуется дополнение полученных результатов с точки зрения изучения влияния большего количества факторов (как технологических, так и ресурсных (экономических)) на процесс мембранной фильтрации при очистке сточных вод.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенных исследований эксплуатационных характеристик мембранных элементов можно сделать следующие выводы:

- при увеличении давления свыше 0,2 МПа наблюдается резкое увеличение количества взвешенных веществ в фильтрате, т.е. наблюдается проскок загрязнений;
- при работе в двух значениях рабочих давлений наибольшая производительность отмечается при относительно малых дозах ила и давлении 0,2 МПа;
- при увеличении дозы ила наблюдается снижение влияния давления на производительность мембранных модулей;
- полученные результаты экспериментальных исследований требуют продолжения с точки зрения выявления возможностей оптимизации процесса очистки и мембранной фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sathya U., Nithya K.M., Balasubramanian N. Evaluation of advanced oxidation processes (AOPs) integrated membrane bioreactor (MBR) for the real textile wastewater treatment // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 246. Pp. 768–775. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.039
2. Wang H., Xu G., Qiu Z., Zhou Y., Liu Y. NOB suppression in pilot-scale mainstream nitrification-

denitrification system coupled with MBR for municipal wastewater treatment // *Chemosphere*. 2019. Vol. 216. Pp. 633–639 DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.187

3. Степанов С.В., Сташок Ю.Е., Габидуллин Л.А. Модульные мембранные биореакторы // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2017. № 2 (110). С. 40–42.

4. Li T., Zhang L., Ai W., Dong W., Yu Q. A modified MBR system with post advanced purification for domestic water supply system in 180-day CELSS: Construction, pollutant removal and water allocation // *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 222. Pp. 37–43 DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.023
5. Nawaz M.S., Parveen F., Khan S.J., Hankins N.P. Impact of osmotic backwashing, particle size distribution and feed-side cross-flow velocity on flux in the forward osmosis membrane bioreactor (FO-MBR) // *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 31. P. 100861. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100861
6. Gündoğdu M., Jarma Y.A., Kabay N., Pek T.Ö., Yüksel M. Integration of MBR with NF/RO processes for industrial wastewater reclamation and water reuse-effect of membrane type on product water quality // *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 29. P. 100574. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.02.009
7. Barreto C.M., Garcia H.A., Hooijmans C.M., Herrera A., Brdjanovic D. Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017. Vol. 119. Pp. 528–537. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.10.006
8. Krzeminski P., Leverette L., Malamis S., Katsou E. Membrane bioreactors — A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. Pp. 207–227. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.010
9. Gkotsis P.K., Batsari E.L., Peleka E.N., Tolkou A.K., Zouboulis A.I. Fouling control in a lab-scale MBR system: Comparison of several commercially applied coagulants // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 203. Issue 2. Pp. 838–846. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.03.003
10. Ng A.N.L., Kim A.S. A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters // *Desalination*. 2007. Vol. 212. Issue 1–3. Pp. 261–281. DOI: 10.1016/j.desal.2006.10.013
11. Gander M., Jefferson B., Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations // *Separation and Purification Technology*. 2000. Vol. 18. Issue 2. Pp. 119–130. DOI: 10.1016/S1383-5866(99)00056-8
12. Krzeminski P., Langhorst W., Schyns P., de Vente D., van Lier J.B. The optimal MBR configuration: Hybrid versus stand-alone — Comparison between three full-scale MBRs treating municipal wastewater // *Desalination*. 2012. Vol. 284. Pp. 341–348. DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.038
13. Yeon K.-M., Park J.-S., Lee C.-H., Kim S.-M. Membrane coupled high-performance compact reactor: A new MBR system for advanced wastewater treatment // *Water Research*. 2005. Vol. 39. Issue 10. Pp. 1954–1961. DOI: 10.1016/j.watres.2005.03.006
14. Gil J.A., Krzeminski P., van Lier J.B., van der Graaf J.H.J.M., Wijffels T., Prats D. Analysis of the filterability in industrial MBRs. Influence of activated sludge parameters and constituents on filterability // *Journal of Membrane Science*. 2011. Vol. 385–386. Pp. 96–109. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.09.030
15. Krzeminski P., Iglesias-Obelleiro A., Madebo G., Garrido J.M., van der Graaf J.H.J.M., van Lier J.B. Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment // *Journal of Membrane Science*. 2012. Vol. 423–424. Pp. 348–361. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.08.032
16. Robles A., Ruano M.V., Ribes J., Ferrer J. Advanced control system for optimal filtration in submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs) // *Journal of Membrane Science*. 2013. Vol. 430. Pp. 330–341. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.11.078
17. Нибусина В.И. Определение критического потока методом «FLUX-STEP» в погружном мембранном биореакторе // *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 11 (67). С. 202–215.

Поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 23 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 26 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: **Николай Алексеевич Макиша** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, директор Научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Current trends in development and improvement of biological treatment processes focus on enhancing the removal of biogenic elements [1]. It's attainable by increasing the treatment time (the term "hydraulic retention time" is in use in the international literature) and the content of mixed liquor suspended solids (MLSS) which cause the size of wastewater treatment facilities to go up. Presently the size of these structures can be reduced if membrane bioreactors are used, as in this case membrane methods and technologies are applied to separate the sludge, and this process does not need a secondary settling tank [2].

The efficiency of membranes is driven by a group of factors, and the key ones are pore dimensions, MLSS, and operating pressure.

It is noteworthy that this area of research does not have enough coverage in our country [3]; therefore, we need to study the publications made by foreign researchers to get a better idea of the most advanced technology development trends. However most of them represent mere descriptions of the process [4–6]. Nonetheless, each process efficiency enhancement, in particular, through capex and power consumption reduction (with power being a major constituent of operating expenses), is of substantial theoretical and practical interest [7–9].

In this article, the author describes a methodology for optimizing operating pressure and MLSS values applied in membrane treatment processes. It's vital to realize that presently membrane bioreactors have submerged membranes, and pressure is built by vacuum pumps [10]. Wastewater is filtered by membranes that have large pores; therefore, they are called microfiltration rather than ultra-filtration membranes [11]. This principle was developed on the basis of the operational experience and the research framework. As known, the lower the operating pressure value, the smaller the sediment resistance growth rate, while the larger the pores, the higher the per-unit permeability of membranes [12]. However, large pores may be clogged by active sludge particles. Therefore, the objective is to minimize power consumption by setting the optimal membrane operation mode [13].

MATERIALS AND METHODS

A submerged membrane is a traditional and most widely spread solution for membrane bioreactors. It often needs supplementary structures or tanks to be built [14–16]. However, when small facilities are restructured, their existing arrangement and layout should remain unchanged, and this idea is particularly relevant in case of limited areas occupied by water treatment

facilities [3, 17]. Therefore, there is a need to study the installation of membranes in close proximity to existing structures; they can function in small containers to avoid the construction of new tanks [1, 5, 7].

The study of membrane performance at higher pressure values and the analysis of capital and operating expenses in case of the so-called "open-air" membrane installation may help to improve membrane efficiency and per-unit capacity.

By means of this research project, the author made an attempt to study membrane performance at different pressure and MLSS values and to obtain information on per-unit capacity of membranes.

The objective of this research phase is to study membrane methods of sludge separation (removal (retention) of suspended biological sludge particles from wastewater) at different pressure values to boost the capacity of membrane bioreactors and to identify the optimal range of operating pressure values which prevent membranes from clogging and contaminants from slipping into the filtrate.

The laboratory bench, which is schematically presented in Figure 1, was used to conduct the experiments.

The membrane produced by Raifil (South Korea), equipped with capillary ultra-filtration membranes (Fig. 2) was used in the experiments. The membrane pore size is 1 micron. The total membrane filter area is one square meter. This membrane module has standard characteristics (pore size, material), typical for ultra-filtration membranes; therefore, we can assume that further results will not demonstrate any substantial discrepancies, if ultra-filtration membranes made by other manufacturers are used.

Source water (mixed liquor) is stored in source water tank 1 and fed into membrane 3 with the help of pump 2. Storage tank 4, pressure switch 5, bypass valve 10 and manometer 12 are used to adjust the operating pressure. The filtrate leaves the membrane to be accumulated in filtrate samplers 7.

The following pressure values were set to hold the experiments: 0.05; 0.1; 0.2 и 0.3 MPa.

Backwashing is an essential constituent of the membrane operation. Any backwashing requires de-ionized water produced by the reverse osmosis unit. Wash water was poured into wash water tank 8 for washing purposes. Spherical valves 6 were used to reroute water flows from one tank to the other one. The pump supplied wash water into the filtrate duct. The wash water passed through the source water duct into wash water samplers 9. Spherical valves 6 were used to reroute water flows from one duct to the other one.

Pressure values were adjusted using pressure switch 5, bypass valve 10, and wash water storage tank 11.

Fig. 1. Laboratory bench layout: 1 — source water tank; 2 — pump; 3 — membrane; 4 — storage tank; 5 — pressure switch; 6 — valve; 7 — filtrate samplers; 8 — wash water tank; 9 — wash water samplers; 10 — bypass valve; 11 — wash water storage tank; 12 — manometer

Fig. 2. The membrane module

RESULTS

Fig. 3 shows the relation between membrane capacity and pressure in the process of de-ionized water filtration. Fig. 4 shows the relation between concentrations of suspended solids in the filtrate and pressure; this relation

helps to identify the operating pressure value at which biological sludge starts “slipping” into the filtrate.

If we analyze both graphs, we will come to the following conclusions. If the pressure goes up, the membrane throughput capacity will go up, as well, as this relationship is fairly linear. Nevertheless, it is evident that if the pressure is below 0.2 MPa (20 meters of water column = 2 atmospheres = 2 bars), the concentration of suspended solids in the filtrate is nearly constant and close to zero; therefore, the membrane retains its high efficiency, if the pressure value is equal to 0–0.2 MPa. If pressure goes up from 0.2 to 0.25 MPa, the amount of suspended solids in the filtrate goes up intensively, and the pressure value of 0.25+ MPa causes a spike in the concentration of suspended solids. Therefore, the pressure of 0.2 MPa is the boundary condition for effective membrane filtration. If the pressure exceeds this value, the concentration of suspended solids surges.

We used these data to design further phases of our experiment. As we were going to examine membrane filtration, operating pressure values were not to exceed 2 MPa — the boundary value that was sufficient for solid particles to penetrate into the filtrate. A decision was made to use two operating pressure values: 0.2 MPa — to assess the performance efficiency within the pre-penetration range and 0.05 MPa, or in vacuum (when the pressure is below the one of the atmosphere). The use of vacuum filtration is typical for submerged membranes. Besides, there was a need to analyze the impact produced by another important parameter of membrane bioreac-

Fig. 3. Relationship between membrane capacity and pressure

Fig. 4. Relationship between concentrations of suspended solids in the filtrate and pressure

tors; that was concentration of suspended solids in the bioreactor. The MLSS value is hard to overestimate, as it produces immediate impact both on biological treatment processes and membrane filtration patterns.

Initially, the following three MLSS values were applied: 1.6, 2.5 and 7 g/l. The first two are close to those traditionally used to treat urban wastewater, while the third one is typical for submerged membrane bioreactors. The most widely spread approach is to set the MLSS value at 7–12 g/l for submerged bioreactors [14]. Therefore, performance characteristics of standalone membranes were exposed to research in the conditions similar to those of traditional treatment methods and in the environment similar to the one of submerged membrane bioreactors.

Fig. 5 shows the relationship between the filtrate amount and the filter cycle duration. As we can see, the filtrate amount is maximal, if the pressure is set at 0.2 MPa and the MLSS value is equal to 1.6 or 2.5 g/l. This is a readily anticipated result: the higher the pressure, the more liquid is filtered, while the smaller the MLSS value, the smaller the resistance to filtration generated by suspended solids.

If we analyze the graphs describing the above relationships for two MLSS and operating pressure values, we will find out that the difference is approximately two-fold, or that the amount of water filtered at the pressure of 0.2 MPa is twice as much as the one filtered at the pressure of 0.05 MPa.

The capacity is minimal at the same pressure values and the MLSS value of 7 g/l. In this event, the difference in the amount of filtered water reaches 20 %, which means that in case of this MLSS value the operating pressure value is not as critical as in the first two events.

These values are represented in relation to the filter cycle duration in Fig. 6 and 7. According to the graphs, if the pressure is equal to 0.05 MPa, the filtrate amount growth, driven by the filter cycle extension, is smooth for each of the three values, and if the pressure is set at 0.2 MPa, the filtrate amount rises smoothly only if the MLSS value is equal to 7 g/l, and the rise is much more intensive, if the filter cycle is extended and the other two MLSS values are applied.

The results suggest that the shorter the filter cycle, the more filtrate is produced per hour. Therefore, we

Fig. 5. Relationship between filtrate amount and filter cycle duration

Fig. 6. Filtrate amount produced in case of different filter cycles (at the operating pressure of 0.05 MPa)

Fig. 7. Filtrate amount produced in case of different filter cycles (at the operating pressure of 0.2 MPa)

find it important and interesting to study the potential process optimization and to identify filter cycle duration and pressure values that ensure minimal water treatment expenses. The more frequent the washings (the shorter the filter cycle), the higher the per-hour water consumption rate and the smaller the “net” capacity of membranes (the difference between the filtrate amount and the amount of consumed water).

Figures 8 and 9 show the graphs illustrating filtered water reduction in the course of filtration at the operating pressure values of 0.05 MPa and 0.2 MPa, respectively. As we can see, if the pressure is equal to 0.2 MPa, high water consumption rate is typical for the initial phase of the filter cycle, which is natural; however, if the operating pressure of 0.2 MPa remains unchanged, the water consumption rate goes down intensively, and as a result, upon the expiration of 4 minutes of the filter cycle, the filtered water consumption rate is nearly the same for each pressure value under consideration. Therefore, operating pressure values produce both direct and reverse effects on filtered water consumption. In other words, any higher consumption at high operating pressure values is “compensated” by more intensive

clogging, which causes filtration velocity and intensity to go down. This fact means that in the course of our further research any findings must be supplemented by the study of the influence produced by numerous factors (both technology- and resource-related) on the process of membrane filtration.

CONCLUSIONS

The following conclusions can be made as a result of our research into the operating characteristics of membranes:

- if the operating pressure exceeds 0.2 MPa, the amount of suspended solids in the filtrate skyrockets and causes a slip of contaminants;
- in the course of operation at two pressure values, maximal capacity is attainable in case of relatively small MLSS values and the pressure of 0.2 MPa;
- if MLSS goes up, the pressure impact on the membrane capacity goes down;
- the findings of the experimental research indicate the need to identify potential optimization techniques for wastewater treatment and membrane filtration.

Fig. 8. Filtered water consumption reduction depending on filter cycle duration ($P = 0.05$ MPa)

Fig. 9. Filtered water consumption reduction depending on filter cycle duration ($P = 0.2$ MPa)

REFERENCES

1. Sathya U., Nithya K.M., Balasubramanian N. Evaluation of advanced oxidation processes (AOPs) integrated membrane bioreactor (MBR) for the real textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 2019; 246:768-775. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.039
2. Wang H., Xu G., Qiu Z., Zhou Y., Liu Y. NOB suppression in pilot-scale mainstream nitrification-denitrification system coupled with MBR for municipal wastewater treatment. *Chemosphere*. 2019; 216:633-639. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.187
3. Stepanov S.V., Stashok Yu.E., Gabidullina L.A. Modular membrane bioreactors. *Water treatment. Water purification. Water supply*. 2017; 2(110):40-42. (rus.).
4. Li T., Zhang L., Ai W., Dong W., Yu Q. A modified MBR system with post advanced purification for domestic water supply system in 180-day CELSS: Construction, pollutant removal and water allocation. *Journal of Environmental Management*. 2018; 222: 37-43. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.023
5. Nawaz M.S., Parveen F., Khan S.J., Hankins N.P. Impact of osmotic backwashing, particle size distribution and feed-side cross-flow velocity on flux in the forward osmosis membrane bioreactor (FO-MBR). *Journal of Water Process Engineering*. 2019; 31:100861. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100861
6. Gündoğdu M., Jarma Y.A., Kabay N., Pek T.Ö., Yüksel M. Integration of MBR with NF/RO processes for industrial wastewater reclamation and water reuse-effect of membrane type on product water quality. *Journal of Water Process Engineering*. 2019; 29:100574. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.02.009
7. Barreto C.M., Garcia H.A., Hooijmans C.M., Herrera A., Brdjanovic D. Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017; 119:528-537. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.10.006
8. Krzeminski P., Leverette L., Malamis S., Katsou E. Membrane bioreactors — A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects. *Journal of Membrane Science*. 2017; 527:207-227. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.010
9. Gkotsis P.K., Batsari E.L., Peleka E.N., Tolkou A.K., Zouboulis A.I. Fouling control in a lab-scale MBR system: Comparison of several commercially applied coagulants. *Journal of Environmental Management*. 2017; 203(2):838-846. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.03.003
10. Ng A.N.L., Kim A.S. A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters. *Desalination*. 2007; 212(1-3): 261-281. DOI: 10.1016/j.desal.2006.10.013
11. Gander M., Jefferson B., Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. *Separation and Purification Technology*. 2000; 18(2):119-130. DOI: 10.1016/S1383-5866(99)00056-8
12. Krzeminski P., Langhorst W., Schyns P., de Vente D., van Lier J.B. The optimal MBR configuration: Hybrid versus stand-alone — Comparison between three full-scale MBRs treating municipal wastewater. *Desalination*. 2012; 284:341-348. DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.038
13. Yeon K.-M., Park J.-S., Lee C.-H., Kim S.-M. Membrane coupled high-performance compact reactor: A new MBR system for advanced wastewater treatment. *Water Research*. 2005; 39(10):1954-1961. DOI: 10.1016/j.watres.2005.03.006
14. Gil J.A., Krzeminski P., van Lier J.B., van der Graaf J.H.J.M., Wijffels T., Prats D. Analysis of the filterability in industrial MBRs. Influence of activated sludge parameters and constituents on filterability. *Journal of Membrane Science*. 2011; 385-386:96-109. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.09.030
15. Krzeminski P., Iglesias-Obelleiro A., Madebo G., Garrido J.M., van der Graaf J.H.J.M., van Lier J.B. Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*. 2012; 423-424:348-361. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.08.032
16. Robles A., Ruano M.V., Ribes J., Ferrer J. Advanced control system for optimal filtration in submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs). *Journal of Membrane Science*. 2013; 430:330-341. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.11.078
17. Nibulina V.I. Determination of critical flux by means of "FLUX-STEP" method in submerged membrane bioreactor. *Modern scientific researches and innovations*. 2016; 11(67):202-215. (rus.).

Received November 25, 2019.

Adopted in a revised form on December 23, 2019.

Approved for publication February 26, 2020.

BIONOTES: **Nikolay A. Makisha** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water supply and waste water treatment, director of Education and Research Centre "Water supply and waste water treatment"; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mg-su.ru.