

музеев, тем богаче станет наш общий опыт в понимании культур прошлого и настоящего и тем более ценным он будет для каждого отдельного музея. Наша культура – это великое богатство в наших руках, и мы должны сохранить и передать его потомкам.

Список литературы

1. Гачев Г.Д. Космо-Психо-Логос: Национальные образы мира. М.: Академический проект, 2007. 511 с.
2. Гнедовский Б.В. Методические рекомендации для подготовки предпроектной документации и проектирования музеев под открытым небом: История создания и общая методика. М.: Ликбез, 1981. 18 с.
3. Зеленков А.И., Анохина В.В., Ждановский А.П. Философия. Минск: Электронная книга БГУ, 2003. 334 с.
4. Сапожникова Е.Н. Страноведение. Теория и методика туристского изучения стран. М.: Академия, 2005. 240 с.
5. Тихонов В.В. Практика создания зарубежных и российских этнографических музеев под открытым небом // Вестник ЗабГУ. 2012. № 9 (88). С. 3-8.
6. Пермиловская А.Б. Особенности формирования экспозиции русских и европейских Скансенов // Грамота. 2014. № 5. С. 22-28.
7. Субботина Е.В. Организация питания туристов. М.: МИИР, 2008. 211 с.
8. Липинская В.А. Адаптивно-адаптационные вопросы в народной культуре питания русских // Традиционная пища как выражение этнического самосознания. М.: Наука, 2001. С. 134-138.
9. Музей и современные технологии: материалы Всерос. науч. конф. - Томск, 20 - 23 мая 2003 г., Изд-во Томск. ун-та, 2006. - 300 с.
10. Музейная экспозиция. Теория и практика. Искусство и экспозиция. Новые сценарии и концепции: сб. науч. тр. / отв. ред.- сост. М.Т. Майстровская. - М., 1997. - 365 с.,
11. Никонова А. А., Бирюковой М. В Сборник статей по материалам международной конференции. Спб.: Спбгу, 2013-63с.
12. Частное собирательство в России в XVII - XVIII вв. / С. А. Овсянникова // Очерки истории музейного дела в России. Вып. 3. - М.: Совет. Россия, 1961. - С. 48 - 63. 26. Поляков, Т. П. Как делать музей? (О методах проектирования музейной экспозиции) / Т. П. Поляков. - М.: [Б.и.], 1997. - 454 с.
13. Гастрономические туры России // Гастрономия и путешествия. [Электронный ресурс]/Доступ URL: <http://www.simpletravel.ru/programmy/rossiy>, свободный
14. Скансен // Скансен. Русская версия. [Электронный ресурс] Доступ URL: www.skansen.se/de/kategori/russian
15. Туристический путеводитель по Астрахани/ Город Астрахань и Астраханская область/ Туризм в Астрахани и Астраханской области / http://www.carone.ru/volga_guide_astrakhan.html [Электронный ресурс] Доступ URL: [online.ru/volga_guide_astrakhan.html](http://www.carone.ru/volga_guide_astrakhan.html)

© Н. И. Ермолин

Ссылка для цитирования:

Н. И. Ермолин. Этнографический музей под открытым небом // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГА-СУ», 2020. № 2 (32). С. 58–63.

УДК 628.3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕМБРАННЫХ БИОРЕАКТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗАХ ИЛА

Н. А. Макиша, М. С. Кирюшина

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Статья посвящена исследованию работы мембранных биореакторов (МБР), применяемых для очистки сточных вод. Данная технология очистки получила достаточно широкое распространение, однако имеющиеся научные данные зачастую противоречивы. В настоящей работе на основании экспериментов в лабораторных условиях с фильтрованием сточной воды с различными дозами ила (от 1000 до 8000 мг/л) при различных давлениях проведены исследования по определению оптимальных режимов эксплуатации мембран, соответствующих минимальным значениям эксплуатационных затрат (на электроэнергию и замену мембран). Отмечается, что при реконструкции систем биологической очистки в ряде случаев применение систем обратного осмоса с предочисткой методом ультрафильтрации даёт возможность эффективно очищать воду с высоким значением ХПК и взвешенных веществ, оказывается эффективнее мембранных биореакторов и аэротенков с глубоким удвоением биогенных веществ.

Ключевые слова: *очистки сточных вод, мембранный биореактор, доза ила, рабочее давление, энергопотребление.*

RESEARCH OF OPTIMAL WORKING PRESSURE FOR MEMBRANE BIOREACTORS IN CONDITION OF VARIOUS VALUES OF MIXED LIQUOR SUSPENDED SOLIDS CONCENTRATIONS

N. A. Makisha, M. S. Kiryushina

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

The article touches upon the study of the operation of membrane bioreactors (MBR) used for wastewater treatment. This technology is widely used, but the available research data is often contradictory. In this paper, based on lab-scale experiments of wastewater filtration with different mixed liquor suspended solids (MLSS) values (from 1000 to 8000 mg/L) and at different pressures, research was conducted to determine the optimal membranes operating modes that correspond to the minimum operating costs (for electricity and membrane replacement). It is noted that in the reconstruction of biological treatment systems, in some cases, the use of reverse osmosis systems with pre-treatment by ultrafiltration allows more efficient water purifying with a high value of COD and suspended solids, comparing with membrane bioreactors and conventional activated sludge treatment with nutrients removal.

Keywords: *wastewater treatment, membrane bioreactor, mixed liquor suspended solids, operating pressure, energy consumption.*

Введение

Мембранные биореакторы обеспечивают высокую эффективность биологической очистки сточных вод и экономию площади (объемов) всех сооружений биологической очистки [1–3]. Это объясняется тем, что в мембранных биореакторах дозу ила можно увеличивать до значений 5000–10000 мг/л и, соответственно, пропорционально увеличению дозы ила уменьшать объем аэротенка [4]. В традиционных сооружениях биологической очистки увеличение дозы ила влечет за собой увеличение объемов сооружений по его отстаиванию (вторичных отстойников) [5–6]. А в мембранных биореакторах роль отстойников играют мембранные аппараты, задерживающие ил. Мембранные аппараты имеют очень малый объем (по сравнению с «классическими» сооружениями), поэтому в результате применения мембран достигается эффект уменьшения объема всех сооружений биологической очистки [7].

Мембранные биореакторы широко применяются в схемах очистки сточных вод, однако преимущественно за рубежом [1, 4, 6]. При этом, сведения по их применению могут содержать противоречивые данные по различным характеристикам, как по величинам поверхности и стоимости мембран, так и по затратам электроэнергии [2, 8, 9]. Известно, что чем выше величина рабочего давления при фильтровании через мембрану, тем больше величина удельной производительности мембран, и тем, соответственно, меньше требуемая площадь поверхности мембран и тем ниже стоимость применяемого мембранного оборудования [10, 11]. С другой стороны, чем выше величина рабочего давления, тем больше величина удельных затрат электроэнергии на фильтрование 1 м³ воды [12–14]. Кроме того, с ростом концентрации взвешенных веществ (дозы ила) более интенсивно растет сопротивление осадка взвешенных веществ на мембране и, соответственно, быстрее падает величина ее удельной производительности в процессе фильтроцикла [15, 16].

Материалы и методы

В настоящей работе на основании экспериментов с фильтрованием сточной воды с различными дозами ила (от 1000 до 8000 мг/л) при различных давлениях проведены исследования по определению оптимальных режимов эксплуатации мембран, соответствующих минимальным значениям эксплуатационных затрат (на электроэнергию и замену мембран). Эксперименты проводились на лабораторной установке с применением ультрафильтрационного мембранного аппарата с капиллярными мембранами (размер пор 0,1 мкм) и площадью поверхности мембран 1 м². Схема прове-

дения эксперимента и схема лабораторной установки показана на рисунке 1.

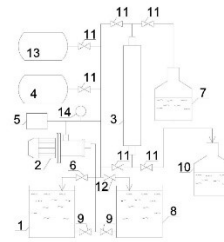


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – бак исходной воды; 2 – шестеренчатый насос; 3 – ультрафильтрационный аппарат с капиллярными мембранами; 4 – бак-гидроаккумулятор исходной воды; 5 – реле давления; 6 – клапан сброса промывной воды; 7 – бак сбора фильтрата; 8 – бак промывной воды; 9 – клапаны подачи воды в насос 2; 10 – бак сбора промывной воды; 11 – краны переключения режима с рабочего на режим промывки; 12 – кран сбросараствора после промывки; 13 – бак-гидроаккумулятор промывной воды; 14 – манометр

Результаты

По результатам экспериментов построены графики зависимостей объема фильтрата от времени для различных давлений и доз ила (рис. 2).

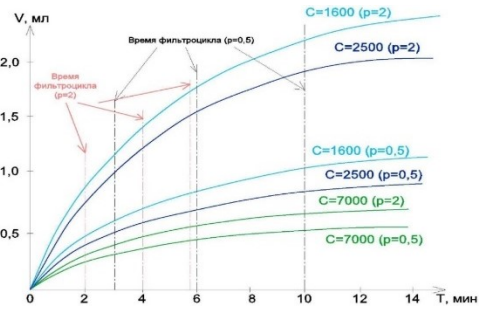


Рис. 2. Снижение производительности мембраны с течением времени для различных значений рабочего давления и доз ила

После построения кривой зависимости графическим способом можно определить величину скорости фильтрования при помощи тангенсов угла наклона касательных в заданный момент времени. На рисунках 3а и 3б представлены зависимости изменения скоростей фильтрования для разных величин доз ила в воде, направляемой на обработку, при различных давлениях в течение фильтроцикла.

Для определения объема пермеата, полученного в результате фильтрации через мембрану за заданный промежуток времени, можно воспользоваться графическим способом, который заключается в определении площади фигуры, ограниченной осями абсцисс и ординат, полученной кривой зависимости, а также перпендикуляром, проведенным от оси абсцисс до кривой. Точка на оси абсцисс будет соответствовать моменту времени, для которого необходимо определить объем.

При анализе полученных зависимостей (рис. 3–5) можно сделать несколько. Во-первых, снижение скорости фильтрования происходит более интенсивно в условиях большей дозы ила (более высокой концентрации взвешенных веществ) в филь-

треумой сточной воде. Во-вторых, интенсивность снижения производительности зависит и от значения рабочего давления – большее давление приводит к большему сопротивлению слоя осадка. В-третьих, низкое давление, само собой, снижает удельную производительность мембран. И в-четвертых, чем меньше продолжительность фильтроцикла, тем больше оказывается величина общего количества получаемой воды в час.

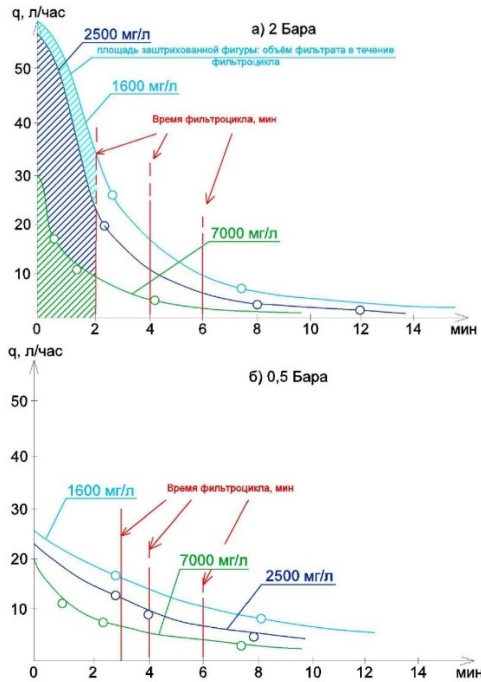


Рис. 3. Зависимости объемов профильтрованной воды от времени эксперимента для различных значений давления и доз ила: а) $P = 2$ Бара, б) $P = 0,5$ Бара

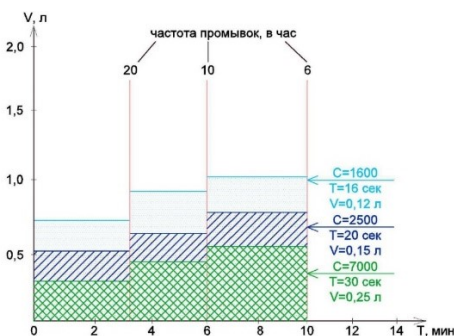


Рис. 4. Зависимость объема профильтрованной воды от времени фильтроцикла и определение частоты промывок и продолжительности фильтроцикла для давления 0,5 Бара

Таким образом, значительный интерес представляет задача оптимизации процесса, то есть, определения продолжительности фильтроцикла и величины рабочего давления, при которых возможно достижения наименьших затрат на обработку сточных вод в мембранных аппаратах.

Важно понимать, что меньшая продолжительность фильтроцикла (и большая величина пермеата в час) имеет и обратную сторону – более частые промывки, что безусловно снижает «полезную» производительность мембран,

если рассматривать эту величину как разницу между расходом пермеата и расходом воды на проведение промывок.

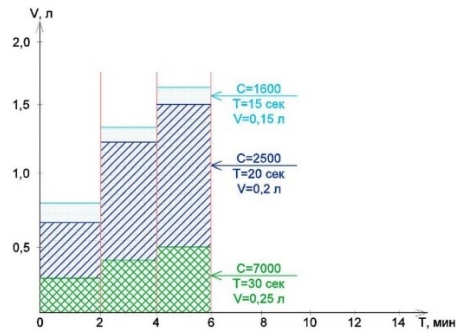


Рис. 5. Определение частоты промывок и продолжительности фильтрования для разных доз ила при давлении 2 Бара

Факторами, влияющими на эффективность промывок, являются давление и продолжительность промывки. При этом самую эффективность промывки можно рассмотреть с точки зрения эффекта удаления с поверхности мембраны взвешенных частиц, образовавшихся в результате фильтроцикла. может оцениваться по степени удаления (в %) взвешенных веществ, накопленных на поверхности мембраны в течение фильтроцикла. На рис.6 представлены зависимости количества удаленных взвешенных веществ от времени фильтроцикла и объемов профильтрованной воды в течение фильтроцикла для разных условий обработки воды.

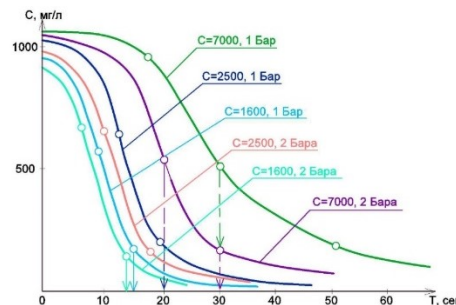


Рис. 6. Зависимость концентрации взвешенных веществ в пробах промывной воды от времени промывки: определение продолжительности промывок

Промывка осуществлялась путем подачи промывной (деионизированной после обратного осмоса) воды рабочим насосом в трубопровод фильтрата аппарата ультрафильтрации. Полученную при промывке обратным током через мембрану воду вместе с удаленными загрязнениями собиралась пробоотборниками. Как видно на рис.6, удаление свыше 90 % взвеси, накопленной на поверхности мембраны, происходит в течение 30–40 сек. промывки. И, что логично, при более высоком давлении промывка происходит эффективнее и за меньшее количество времени, однако затраты воды и электроэнергии возрастают.

При анализе затрат на проведение промывочных процедур мы исходили из того, что для

удаления с поверхности мембран осадка, полученного при фильтровании воды при рабочем давлении 2 бара сточных вод с содержанием взвеси 1600 и 2500 мг/л, промывки проводились при давлении 2 Бара, а продолжительность фильтроцикла составляла 2 и 4 мин, что соответствует частоте промывок в час соответственно 30 и 15.

Для фильтроциклов, проведённых при давлении 0,5 Бара, продолжительность фильтроцикла (при тех же дозах ила в фильтруемой сточной воде) может быть увеличена до значений 180 и 360 сек. (что составляет частоту 20 и 10 раз в час). При очистке воды с содержанием взвеси 7000 мг/л при фильтровании под давлением 2 Бара частоту промывки приняли 10 раз в час, а при фильтровании под давлением 0,5 Бара – 6 раз в час. Давление при промывке принято 3 Бара.

Примеры обработки экспериментальных данных для величины давления 0,5 бара представлен на рисунках 7 и 8. На рисунке 7 показаны зависимости величины общей удельной производительности мембран (в л/ч) от содержания взвеси в исходной воде и частоты проведённых промывок. В зависимости от частоты промывок продолжительность фильтроцикла и величина общей производительности мембран изменяется.

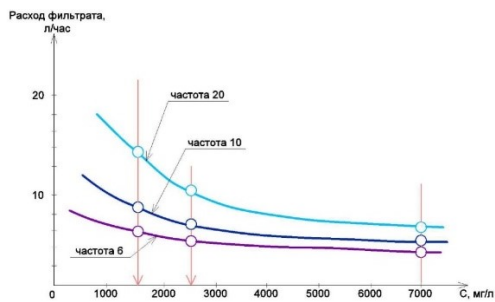


Рис. 7. Зависимость объема воды, полученного в процессе одного фильтроцикла от дозы ила при разных продолжительностях фильтроцикла (количествах промывок в час) при давлении 0,5 Бара

С увеличением содержания взвеси в исходной воде величина общей производительности падает. Как видно на рисунке 8, с ростом концентрации взвеси в исходной воде увеличиваются расходы на промывку за счёт частоты и увеличения времени.

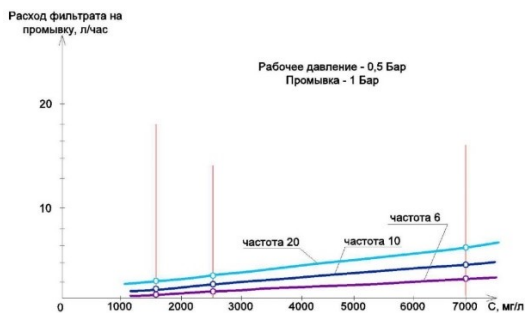


Рис. 8. Зависимости расходов промывочной воды от дозы ила для разных продолжительностей фильтроцикла (количества промывок в час) для рабочего давления 0,5 Бара

На рисунке 9 представлены примеры определения «полезного» расхода воды от концентрации взвеси в исходной воде при фильтровании под давлением 0,5 бара для различных условий промывки (различных значений частоты промывок при давлении промывки 2 бара). На каждом рисунке (для каждой частоты промывки) построены зависимости следующих величин от дозы ила:

- расхода воды для одного фильтроцикла;
- расхода промывочной воды;
- общего расхода воды, определяемого, как сумма расхода воды для одного фильтроцикла и расхода на промывку;
- полезного расхода воды, определяемого, как разница между расходом воды для одного фильтроцикла и расходом на промывку.

Для определения величины удельных затрат электроэнергии было принято, что площадь мембран в мембранном элементе составляла 1 м². При определении затрат электроэнергии было принято (исходя из Q-N характеристик центробежных насосов), что затраты необходимая мощность насоса, требуемая для перекачки 1 м³/ч на высоту 5 м, составляет 0,5 кВт.

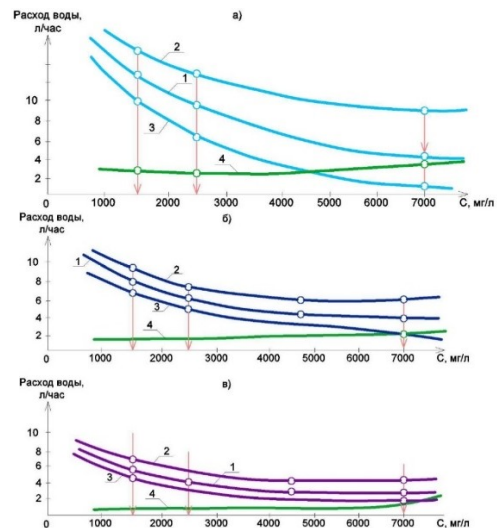


Рис. 9. Определение расходов очищенной воды (величин «полезных» расходов с учетом расходов воды на «собственные нужды») в зависимости от доз ила и частоты проведения промывок:

а) частота 20 промывок в час; б) частота 10 промывок в час; в) частота 6 промывок в час. 1 – расход для одного фильтроцикла; 2 – расход общий (для расчёта удельного расчёта электроэнергии); 3 – расход полезный; 4 – расход на промывку

На рисунке 10 показаны величины расходов электроэнергии, рассчитанные для расходов воды, показанных на рисунке 9, для общего расхода воды и полезного расхода воды.

Величины «реального» удельного расхода электроэнергии была выражена, исходя из затрат электроэнергии для обеспечения «полезного» расхода воды (отношение произведения $Q_{уд}$ и $Q_{общ}$ к полезному расходу). Это показывает, что реальный расход электроэнергии состо-

ит из затрат как на фильтрование, так и на промывку, а удельный расход электроэнергии должен учитывать все затраты электроэнергии на обеспечение только полезного расхода воды (без учета расхода на промывку), идущего к потребителю (рис. 11).

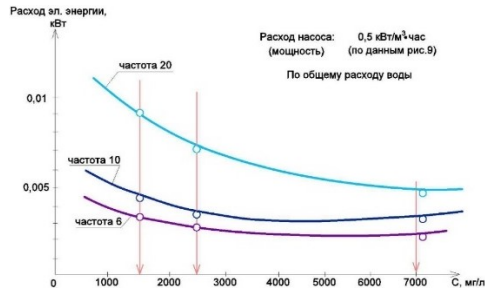


Рис. 10. Зависимость величины удельного расхода электроэнергии от дозы ила и частоты промывок

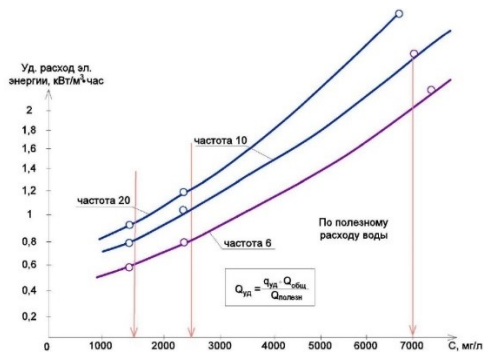


Рис. 11. Зависимость величины удельного расхода электроэнергии для получения 1 м³/ч «полезного» расхода воды от дозы ила

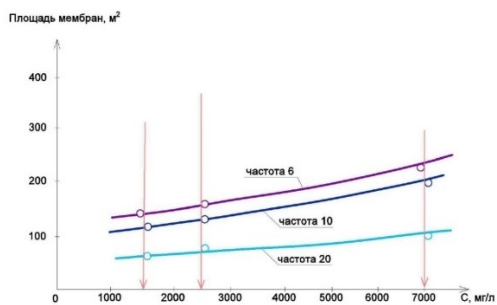


Рис. 12. Зависимость требуемой площади поверхности мембран для получения 1 м³/ч очищенной воды при давлении 0,5 Бара

Аналогично были определены расходы очищенной воды при фильтровании сточной воды под давлением 2 Бара и расходы промывной воды для различных концентраций в исходной воде взвешенных веществ и частоты промывок. Значения удельных расходов получены, исходя из расчетов, что удельный расход электроэнергии, потребляемого центробежным насосом для подачи одного кубического метра воды под давлением 2 Бара составляет 0,4 кВт, а под давлением 0,5 бара – 0,15 кВт. На рисунках 12 и 13 показаны результаты определений площади мембран, необходимые для обеспечения удельной производительности, как показано на рисунках 10 и 11.

Площади мембран (количество мембранных аппаратов) рассчитаны для частот 6, 10 и 20 при P=0,5 Бар и частот 10,20 и 30 при P=2 Бар. Расчеты, показанные на рис. 12 и 13 сделаны для установки производительности 1000 л/ч. Расчеты удельных расходов электроэнергии были проведены в зависимости от давления.

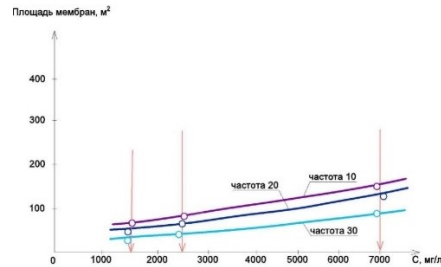


Рис. 13. Зависимость требуемой площади поверхности мембран для получения 1 м³/ч очищенной воды при давлении 2 Бара

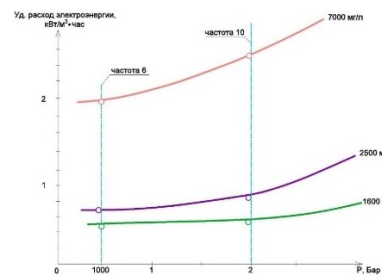


Рис. 14. Результаты определения величины удельного расхода электроэнергии от величины рабочего давления для различных доз ила в мембранном биореакторе

На рис.15а представлены результаты определения годовых эксплуатационных затрат (затрат на электроэнергию и на замену мембран) для установки производительностью 1000 л/ч. Затраты на замену мембран определялись исходя из стоимости мембранных аппаратов (принята удельная стоимость аппарата с площадью мембраны 1м², равная 1200 руб.) и при условии их замены 1 раз в 5 лет. Пример поиска оптимальных значений величины рабочего давления и дозы ила показан на рисунке 15. Зависимость величины удельных эксплуатационных затрат (сумма затрат на электроэнергию и на замену мембран) от величины рабочего давления показана на рисунке 15а. На рисунке 15б представлен пример оптимизации приведенных затрат – определение оптимального значения дозы ила в воде, подаваемой на очистку с применением ультрафильтрационных мембран, при которой сумма годовых приведенных затрат (сумма капитальных и эксплуатационных затрат) является минимальной. Оптимизационные расчеты проведены для установки производительностью 1000 м³/сут, где, в зависимости от дозы ила, учтены капитальные затраты на строительство аэротенка и затраты на мембраны.

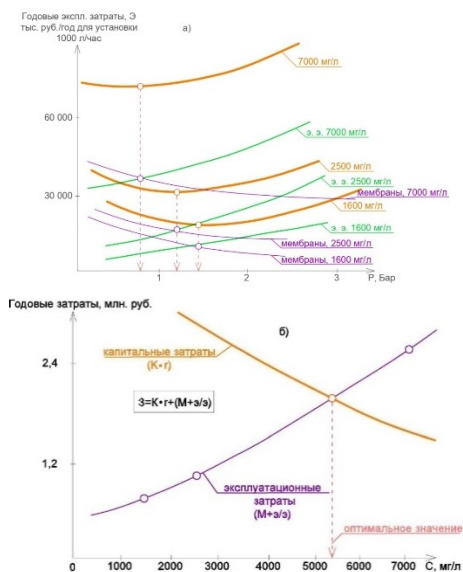


Рис. 15. Определение оптимальных значений рабочего давления и дозы ила: а) зависимость удельного значения эксплуатационных затрат (руб. за 1 м³ в час) от выбранной величины рабочего давления; б) зависимость приведенных затрат от дозы ила в мембранном биореакторе

Выводы

1. Количество взвешенных веществ в воде, поступающей в установки ультрафильтрации, оказывает влияние на производительность установки и удельные затраты электроэнергии.
2. С ростом величины рабочего давления падают удельные затраты электроэнергии на обработку воды.
3. При реконструкции систем биологической очистки в ряде случаев применение систем обратного осмоса с предочисткой методом ультрафильтрации даёт возможность эффективно очищать воду с высоким значением ХПК и взвешенных веществ и оказывается эффективнее мембранных биореакторов и аэротенков с глубоким удвоением биогенных веществ.
4. Требуется дальнейшее проведение исследований с целью определения влияния дозы ила, рабочего давления и продолжительности фильтроцикла на качество очистки сточных вод.

Список литературы

1. Robles A., Ruano M. V., Ribes J., Seco A., Ferrer J. A filtration model applied to submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs) // Journal of Membrane Science. 2013. Т. 4441. С. 139-147
2. Blandin G., Gautier C., Toran M.S., Monclús H., Rodriguez-Roda I., Comas J. Retrofitting membrane bioreactor (MBR) into osmotic membrane bioreactor (OMBR): A pilot scale study // Chemical Engineering Journal. 2018. Т. 339. С. 268-277
3. 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. Т. 527. С. 207-227
4. 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. Т. 203. часть 2. С. 838-846
5. Yigit N.O., Civelekoglu G., Harman I., Koseoglu H., Kitis M. Effects of various backwash scenarios on membrane fouling in a membrane bioreactor // Desalination. 2009. Т. 237. № 1-3. С. 346-356
6. Yao W., Wang Z., Peng Song P. The cake layer formation in the early stage of filtration in MBR: Mechanism and model // Journal of Membrane Science. 2018. Т. 5591. С. 75-86
7. 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. Т. 430. С. 330-341
8. Степанов С.В., Сташок Ю.Е., Габидулина Л.А. Модульные мембранные биореакторы // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 2 (110). С. 40-42.
9. 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. Т. 119. С. 528-537
10. Gündoğdu M., Jarra 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. Т. 29, №100574
11. Patsios S. I., Karabelas A. J. An investigation of the long-term filtration performance of a membrane bioreactor (MBR): The role of specific organic fractions // Journal of Membrane Science. 2011. Т. 372. С. 102-115
12. Tewari P. K., Singh R. K., Batra V. S., Balakrishnan M. Membrane bioreactor (MBR) for wastewater treatment: Filtration performance evaluation of low cost polymeric and ceramic membranes // Separation and Purification Technology. 2010. Т. 71. С. 200-204
13. Grélot A., Tazi-Pain A., Weinrich L., Lesjean B., Grasmic A. Evaluation of a novel flat sheet MBR filtration system // Desalination. 2009. Т. 236. С. 111-119
14. Iorhemen O.T., Hamza R.A., Tay J.H. Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials // Bioresource Technology. 2017. Т. 240. С. 9-24
15. 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. Т. 39. № 10. С. 1954-1961
16. 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. Т. 423-424. С. 348-361

© Н. А. Макиша, М. С. Кирюшина

Ссылка для цитирования:

Н. А. Макиша, М. С. Кирюшина. Исследования по выбору оптимальных значений рабочего давления для проектирования мембранных биореакторов при различных дозах ила // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. №2 (32). С. 63-68.