ТЕХНОЛОГИИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ПРИ ОЧИСТКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И БОРЬБА С ОБРАСТАНИЕМ МЕМБРАН

М.К. Джубари, Н.В. Алексеева

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Многие отрасли промышленности ежедневно производят большие объемы сточных вод, содержащих органические соединения, неорганические соли и взвешенные примеси. Неотъемлемой частью современных промышленных очистных сооружений является система мембранной очистки. Область применения мембранных процессов разделения ограничена рядом требований: отсутствие взвешенных частиц в обрабатываемых водных растворах, имеется ряд ограничений в кислотности и температуре разделяемых растворов. Одной из важнейших задач в обеспечении рентабельности всего процесса обработки является длительный срок службы мембран, которого возможно достичь предотвращением обрастания поверхности мембран. Наиболее распространенным процессом очистки вод является обратноосмотический процесс разделения. В работе рассмотрен процесс осадкообразования на обратноосмотических мембранах, особое внимание уделяется химической очистке. Проведен анализ работ, посвященных вопросу обрастания обратноосмотических мембран в различных растворах. Рассмотрены различные конструкции мембранных элементов, описан механизм переноса через обратноосмотическую мембрану, учитывая явления концентрационной поляризации у поверхности мембраны. Подробно описаны различные способы борьбы с загрязнением мембран в промышленных сточных водах: предварительная обработка, очистка мембран и модификация поверхности. Авторы резюмируют, что состав исходного раствора является важным фактором, влияющим на производительность обратноосмотической установки. Кроме того, предварительная обработка водных растворов перед процессом обратноосмотического разделения приводит к уменьшению обрастания мембранной поверхности и значительно увеличивает срок службы мембранного элемента. Эффективно в качестве процесса предварительной обработки использовать процесс ультрафильтрационного разделения.

Ключевые слова: обрастание мембран, обратный осмос, перенос вещества через мембрану, промышленные сточные воды.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что вода покрывает около 71 % поверхности Земли, она является ценным продуктом, так как только 0,03% водных запасов Земли могут быть использованы человеком. Рост населения планеты и увеличение объемов промышленного производства привели к постоянному росту спроса на воду. Очевидно, расход воды необходимо минимизировать, а возвращать в окружающую среду следует максимально очищенную воду, поскольку она имеет ограниченную способность к самоочищению. Процесс очистки сточных вод на современном этапе развития промышленности весьма важен [1]. За последние два десятилетия в мире были предприняты крупномасштабные экологические инициативы, которые привели к строгому экологическому регулированию промышленных выбросов предприятий химической промышленности. Значительно увеличились инвестиции в чистые технологии и в более эффективные методы очистки. Химическая промышленность включает в себя предприятия, производящие химические вещества для производственных нужд. Основные химические вещества, или химикаты неспецифического действия, – это фармацевтические продукты, полимеры, сыпучие продукты нефтехимии и промежуточные продукты, другие производные и основные продукты

химической промышленности, неорганические/органические вещества и удобрения. Химическая промышленность сильно влияет на окружающую среду [2].

Химические промышленные сточные воды обычно содержат органические и неорганические вещества в различных концентрациях. Многие материалы химической промышленности токсичны, мутагенны, канцерогенны и / или почти не поддаются биологическому разложению. Промышленные сточные воды содержат широкий спектр трудноудаляемых веществ. Поверхностно-активные вещества и нефтяные углеводороды, в том числе химические продукты, используемые в химической промышленности, снижают эффективность работы многих очистных сооружений [3].

Мембранные технологии повсеместно применяются для очистки питьевой воды и сточных вод в связи со снижением цен на мембраны и ужесточением требований к качеству воды. Мембранные методы разделения характеризуются низкой энергозатратностью, чистотой и простотой технологий, способностью заменить ряд традиционных методов, таких как фильтрация, дистилляция, ионообмен и химическая обработка. Использование мембранных методов требует меньшего по объему и более эффективного оборудования и приводит к получению

высококачественной продукции. Мембранные методы позволяют повысить гибкость проектирования систем [4]. Микрофильтрация (МФ), ультрафильтрация (УФ), нанофильтрация (НФ) и обратный осмос (ОО) все чаще применяются для очистки нефтесодержащих сточных вод [2]. Причем мембраны МФ задерживают только взвешенные частицы, мембраны УФ задерживают взвешенные частицы и высокомолекулярные соединения, мембраны НФ - низкомолекулярные соединения, а мембраны ОО способны задерживать ионы [4].

Размер пор мембраны в этих процессах уменьшается в ряду «микрофильтрация – ультрафильтрация – нанофильтрация – обратный осмос» [5]. При уменьшении размера пор диффузионное сопротивление мембраны возрастает, что влечет увеличение давления для сохранения потока [6]. Загрязняющие вещества, присутствующие в сточных водах, часто представляют растворенные в воде компоненты. Химические предприятия характеризуются сточными водами высокой минерализации. Очистка подобных водных систем баромембранными методами мало целесообразна в связи с высокими значениями рабочих давлений [7]. Кроме того, ограничениями для баромембранных процессов являются высокие энергозатраты, затраты на химическую очистку и срок службы мембран [8]. Как правило, в процессе обратного осмоса вода проходит через полупроницаемую мембрану, которая задерживает неорганические компоненты, некоторые органические соединения, в том числе пестициды [4].

Мембраны ОО играют важную роль в любой современной системе очистки сточных вод химических производств. Предотвращение загрязнения мембран в этих перспективных процессах мембранного разделения является важнейшей задачей для обеспечения их рентабельности.

1. ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Наиболее высокой степени очистки можно добиться, используя четыре этапа очистки промышленных сточных вод: предварительная, первичная, вторичная и третичная очистка. Предварительная очистка включает в себя удаление крупных частиц, а также взвешенных частиц, содержащихся в сточных водах. Второй этап – это первичная очистка, которая включает удаление взвешенных органических и неорганических твердых веществ с помощью физических методов, очищенная сточная вода при этом называется первичным стоком. Третий этап – вторичная обработка, при которой разрушаются неудаленные взвешенные вещества и остаточные органические соединения. Вторичная обработка включает биологическую (бактериальную) деградацию нежелательных продуктов. Четвертый этап – это третичная обработка, обычно химический

процесс, очень часто включающий остаточную дезинфекцию.

1.1. ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Процесс обратного осмоса успешно используется в самых разных областях – от обработки артезианских вод до очистки поверхностных и сточных вод [9]. Описано применение мембранных технологий при очистке сточных вод химической [10], текстильной [11], целлюлозно-бумажной [12], нефтяной и нефтехимической [10], пищевой [13], кожевенной [14] и металлообрабатывающей промышленности [15]. Большинство работ по обработке промышленных сточных вод с использованием ОО посвящены либо подаваемым водам, содержащим хлорид натрия NaCl [4], либо водам, содержащим красители [16]. В Таблице 1 приведены данные о степени удаления некоторых загрязняющих агентов с помощью мембран ОО [17].

Табл. 1. Степень удаления некоторых загрязнителей с использованием ОО-мембраны

Вещество	Степень удаления
Хлорид натрия	99%
Сульфат натрия	99%
Хлорид кальция	99%
Серная кислота	98%
Соляная кислота	90%
Фруктоза	99%
Сахароза	99%
Вирусы	99%/99%
Белок	99%/99%
Бактерии	99%/99%

Мембраны обратного осмоса обладают рядом преимуществ – высокой эффективностью при избирательном отделении неорганических веществ, высокой проницаемостью для воды, низкой себестоимостью продукции, соответствием требованиям к охране здоровья населения, охране окружающей среды и процессам разделения при комнатной температуре [18]. С другой стороны, одной из главных проблем при применении мембран ОО является их обрастание. Именно обрастание – основная причина низкой эффективности работы оборудования, что может привести к сокращению объемов обработанной воды. Снизить загрязнение мембран можно благодаря их оптимальному проектированию и предварительной обработке сточных вод. Однако во многих случаях обрастание не контролируется и может привести к серьезным проблемам с оборудованием и сокращению срока службы мембран [9].

Поток концентрированного раствора при обратноосмотическом (ОО) разделении сточных вод составляет около 15 – 20 % объема поступающего

потока и содержит концентрированные отходы загрязнителей [19]. Характеристики ОО существенно варьируются в зависимости от качества подаваемой воды, параметров технологического процесса ОО, типа технологии предварительной обработки, а также свойств химических веществ, используемых в качестве антискалентов и биоцидов, которые в некоторых случаях применяют для предотвращения образования биопленки на поверхности мембраны. Успешное отделение мембраной ОО загрязняющих веществ, содержащихся в подаваемой воде, приводит к повышению их концентрации в ООК [20]. Поэтому для обработки такого концентрата необходима соответствующая экономически выгодная технология.

1.2. МОДУЛИ МЕМБРАН ОБРАТНОГО ОСМОСА

Для изготовления мембран обратного осмоса используется более 100 различных материалов. Однако наиболее часто применяют два типа мембран – мембраны, изготавливаемые из ацетата целлюлозы (АЦ), и мембраны из полиамидного тонкопленочного композитного материала (ТПК) [4]. Существует четыре основных типа модулей: плоскосторонние, трубчатые, спиральные (рулонные) и полволоконные (рис.1). Плоскосторонний модуль имеет простейшую конфигурацию: он состоит из двух концевых пластин, плоской листовой мембраны и прокладок. В трубчатых модулях мембрана часто находится внутри трубки, через которую прокачивается очищаемый раствор. Наиболее популярным для нанофильтрационных и обратноосмотических мембран в промышленности является спиральный модуль. Этот модуль содержит плоскую листовую мембрану, обернутую вокруг перфорированной трубки для сбора пермеата. Входящий поток поступает с одного торца элемента, по спирали движется к центральной сборной трубке для пермеата, концентрат выходит с противоположной стороны. Полволоконные модули, используемые для опреснения морской воды, состоят из пучков полых волокон в сосуде высокого давления [21]. В таких модулях фильтрация происходит через пористые стенки микротрубок.

Рис. 1. Схемы модулей обратноосмотических мембран: а) плоскосторонний, б) трубчатый, в) спиральный, г) полволоконный

2. ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА В МЕМБРАНЕ ОО

2.1. ПОТОК ПЕРМЕАТА ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ

Поток пермеата (J_w) – это количество очищенной воды, проходящей через единицу площади поверхности мембраны ОО в единицу времени. Он обычно пропорционален ряду параметров, например, таких как перепад давления на мембране (TMP). Поток растворенного вещества (J_s) – это количество растворенного вещества, проходящего через единицу площади поверхности мембраны в единицу времени. Этот поток пропорционален разности концентраций растворенного вещества на каждой стороне мембраны. Математические выражения для потока пермеата и потока растворенного вещества задаются следующими уравнениями [22]:

$$J_w = \frac{TMP}{\mu R_m}; TMP = \Delta P - \Delta \pi \quad (1)$$

где ΔP , $\Delta \pi$, R_m и μ – это соответственно трансмембранное давление (Па), перепад осмотического давления (Па), мембранное сопротивление и кинематическая вязкость раствора

$$J_s = B(C_m - C_p) \quad (2)$$

где B , C_m и C_p – соответственно коэффициент проницаемости мембраны для данного растворенного вещества, концентрация растворенного вещества с одной стороны мембраны и концентрация растворенного вещества в пермеате.

2.2. ОСМОТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Осмотическое давление в значительной степени связано с таким свойством обрабатываемого раствора, как понижение температуры замерзания, а также некоторыми другими свойствами [22]. Для разбавленных растворов осмотическое давление (π) можно рассчитать с помощью уравнения Вант-Гоффа, приведенного ниже [23]:

$$\pi = iRTC \quad (3)$$

где i – изотонический коэффициент, C – концентрация раствора, R – универсальная газовая постоянная, а T – температура подаваемой воды.

2.3. МОДЕЛИ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ (КП)

В [24] рассмотрена модель поляризационного слоя при поперечном обратном осмосе в щелевом канале. Игнорирование последствий концентрационной поляризации для ОО может привести к недооценке основной движущей силы системы, а также к переоценке ее эффективности и вводных характеристик [25]. Ряд исследований посвящен концентрационной поляризации в мембранных структурах. Классическая модель пленки приграничного слоя является простейшей моделью КП (см. рис. 2) [26].

Рис. 2. Изменение градиента концентрации, вызванное концентрационной поляризацией

Модель зависит от характеристик растворенного вещества [26]:

$$JC_y + D \frac{dC_y}{dy} = JC_p \quad (4)$$

Для решения нужны еще начальные и граничные условия. Решение уравнения (4) по толщине приграничного слоя дает следующую пленочную модель [26, 27]:

$$CP = \frac{C_w}{C} = TR_{obs} + (1 - TR_{obs}) \exp\left(\frac{J_{kD}}{K_D}\right)$$

где D – коэффициент диффузии растворенного вещества в воде, K_D – коэффициент переноса растворенного вещества, TR_{obs} – наблюдаемая скорость отделения.

3. ОБРАСТАНИЕ МЕМБРАНЫ

Загрязнение – это явление, приводящее к потере производительности мембраны из-за осаждения взвешенных или растворенных веществ на ее внешней поверхности, в ее поровых отверстиях или внутри ее пор. Мембраны могут загрязняться неорганическими веществами, биологическими загрязнителями, взвешенными твердыми веществами, коллоидами, оксидами металлов и органическими веществами [28]. Органическое загрязнение и биообрастание, по-видимому, являются наиболее распространенными типами загрязнений, наблюдаемых на мембранах ОО [9].

Более ранние исследования [29, 30] показали, что загрязнение мембран ОО может привести к необходимости увеличения рабочего давления для поддержания потока очищенной воды. Обрастание не только уменьшает поток, но и изменяет отделение растворенных веществ [31]. Загрязнители, или слой загрязнений, – это общий термин для отложений на мембране или в ней, которые отрицательно влияют на разделение. Обрастание может включать в себя несколько стадий, целесообразных или нежелательных, обратимых или необратимых [32]. Обобщение некоторых последних исследований по обрастанию ОО-мембран для различных водных растворов приведено в таблице 2.

Табл. 2. Исследования обрастания мембран в ОО-мембране для различных водных растворов

Вид водного раствора	Тип обрастания	Ссылка
Альгинат натрия	Органический	[33]
Альгинат, ксантан, пуллулан	Органический	[34]
Активный ил	Органический	[35]
Альгинат и краситель метиленовый синий	Органический	[36]
Городские сточные воды	Органический и неорганический	[37]
Синтетические сточные воды, содержащие синегнойную палочку	Биологический	[38]

Кроме того, с точки зрения области возникновения обрастание можно разделить на поверхностное и внутреннее [39]. Механизмы обрастания мембран низкого давления (например, МФ и УФ) несколько отличаются от механизмов обрастания мембран высокого давления (например, НФ и ОО). Для МФ и УФ более распространены адсорбция в порах и их засорение, в то время как для НФ и ОО поверхностное

загрязнение встречается сравнительно чаще из-за относительно компактной и непористой структуры мембраны ОО [40]. Это, однако, не означает, что для мембраны ОО поверхностное загрязнение является более “опасным”, чем внутреннее. На самом деле, по сравнению с внутренним обрастанием, поверхностное обрастание легче контролировать за счет улучшения гидродинамических условий подаваемой воды или химической очистки [41]. Тем не менее, следует уточнить, что в зависимости от состава очищаемой воды и ее взаимодействия с мембраной как поверхностное, так и внутреннее загрязнение может быть необратимым.

Поверхностное обрастание протекает по трем основным механизмам: образование осадка, накипи и биопленки. Образование осадка вызвано осаждением коллоидного вещества (неорганического, органического или биологического) на поверхности мембран ОО. Образование накипи происходит в результате гетерогенной кристаллизации малорастворимых минеральных солей непосредственно на поверхностях мембран ОО. Образование биопленки происходит, когда попавшие в систему микроорганизмы размножаются и колонизируют мембранный модуль [42].

4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ МЕМБРАН

Основной проблемой обратного осмоса, влияющей на скорость восстановления системы, являются загрязнения. Известно множество факторов, определяющих загрязнение обратноосмотической мембраны.

4.1. ВЛИЯНИЕ ПОДАВАЕМОГО РАСТВОРА НА СКОРОСТЬ ОБРАСТАНИЯ

Выбор мембранных технологий зависит от источника очищаемой воды, ее состава и цикла использования. По этой причине при применении мембранных технологий важными задачами являются идентификация и характеристика источников очищаемой воды. Низкомолекулярные растворенные вещества вызывают значительное загрязнение мембран ОО. Органическое загрязнение глубоко проникает в мембраны вместе с очищаемой водой, содержащей относительно высокие концентрации природных органических веществ [43].

4.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОБРАСТАНИЕ

В процессе обратного осмоса повышение температуры снижало вязкость исходного раствора, и тогда раствор легче переносился через мембрану. Таким образом, ожидается, что температура оказывает довольно значительное влияние на поток пермеата и растворение [44]. Mohammadi и др. [45] изучали влияние температуры подачи на обрастание мембраны ОО и пришли к выводу, что обрастание

увеличивается линейно с увеличением температуры в диапазоне 17 – 45 °С. Отмечено также, что с повышением температуры коэффициент диффузии увеличивается, а вязкость уменьшается. Другое исследование, проведенное Al-Mutaz с сотр. [46], показало, что прохождение пермеата и соли через мембрану обратного осмоса увеличивается с повышением температуры подаваемой воды. Таким образом, высокая температура влияет на проницаемость мембраны. Поэтому с целью поддержания требуемого качества очищенной воды и предотвращения загрязнения мембран необходимо оптимизировать системы обратного осмоса.

4.3. ВЛИЯНИЕ pH ПОДАВАЕМОЙ ВОДЫ НА СТЕПЕНЬ ОБРАСТАНИЯ

Увеличение pH очищаемой воды влияет как на ее химический состав, так и на характеристики мембраны ОО. Повышение pH может изменить химический состав воды, влияя на заряд, размер или растворимость ее конкретных компонентов. Рост pH может также определять заряд мембраны ОО и разрушать сильно связанные молекулы, образующие структуру полиамида. Кроме того, эксплуатация мембран при высоком pH может уменьшить органическое загрязнение ОО и действовать как своего рода непрерывная очистка [47].

5. СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ОБРАСТАНИЯ МЕМБРАН

Для решения проблемы загрязнения мембран предпринимается много усилий. Например, уменьшить загрязнение мембран можно было бы за счет улучшения гидродинамики процесса фильтрации [41]. Как правило, снижение загрязнения зависит от типа загрязнения. Неорганические отложения можно сократить с помощью химических и физических методов. Органическое и биологическое обрастание труднее [48]. Рассмотрим некоторые стратегии контроля обрастания мембран.

5.1. ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Предварительная обработка подаваемой воды обеспечивает надежную работу ОО, а также продлевает срок службы мембран. Методы предварительной обработки выбираются на основе анализа состава исходной воды. Исследователями была проделана большая работа по изучению эффективности различных технологий предварительной обработки.

Jiang и др. [49] провели статистический анализ распространенных в последние годы технологий предварительной обработки для ОО. Как показано на рис.3, УФ, коагуляция/флокуляция и МФ – это наиболее изученные технологии, которые широко используются в качестве методов предварительной обработки для ОО.

Рис. 3. Распространенные технологии предварительной обработки для ОО за последние 10 лет

5.2. ОЧИСТКА МЕМБРАН

Очистка мембран является важным элементом регенерации мембран. Очистка может быть определена как «процесс, при котором материал освобождается от вещества, не являющегося неотъемлемой частью материала» [28]. К эксплуатационным условиям, влияющим на эффективность очистки, относятся время очистки, скорость поперечного потока и температура [50]. В процессе очистки не только удаляются отложения, но и восстанавливаются нормальная производительность и селективность системы. Выбор способа очистки зависит от конфигурации модуля, сопротивления мембраны и природы загрязняющих веществ. Тип очистителя зависит от природы загрязняющего вещества и материала мембраны.

Методы очистки для восстановления мембран традиционно делят на три типа: физические, химические и физико-химические. Физическая очистка, основанная на механической обработке, вытесняет и удаляет загрязнения с поверхности мембраны. Химическая очистка зависит исключительно от химических реакций по удалению загрязнений с поверхности мембран. Химические вещества вступают в реакцию с отложениями, накипью, продуктами коррозии и другими загрязнителями [51]. Для химической очистки важен правильный выбор химических реагентов, что обычно обеспечивается благодаря учету типов обрастания и компонентов загрязнителей, а также химических свойств и экономических факторов. Кроме того, химические вещества не должны вызывать никаких химических повреждений мембран. Химические агенты, вступая в реакцию с загрязнителями, уменьшают силы сцепления между загрязнителями, а также адгезию загрязнителей к поверхности мембраны, благодаря чему загрязнители легко удаляются. Обычно используемые химические агенты представляют собой кислоты, основания, поверхностно-активные вещества и хелатообразующие агенты [52]. Кислоты, такие как

соляная, азотная и серная, эффективны для удаления накипи с мембран [53], щелочные растворы, такие как гидроксид натрия, более эффективны для удаления органических загрязнений и биообрастания [54]. Обычно в качестве комплексообразующего агента используют этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) [55]. Согласно исследованию Ang и др., эффективность очистки ЭДТА очень чувствительна к pH раствора. Показано, что эффективность очистки значительно возрастает (от 25 до 44 %) при повышении pH ЭДТА с 4,9 до 11 [56]. Мембраны ОО обычно очищаются отдельно при низком и высоком pH, в зависимости от типа загрязняющего вещества на мембране. Минералы накипи и неорганический коллоидный материал лучше всего удаляются очистителями с низким pH, в то время как органические вещества и биообрастание лучше всего удаляются очистителями с высоким pH [9].

5.3. МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Мембранное обрастание в системах ОО тесно связано с поверхностными характеристиками мембран [57]. Наиболее важными факторами, влияющими на загрязнение мембран, считаются гладкость поверхности и гидрофильность [58]. Мембраны с гладкими и гидрофильными поверхностями демонстрируют меньшую склонность к обрастанию, чем мембраны с шероховатыми и гидрофобными поверхностями [49]. Существует целый ряд методов повышения гладкости поверхности мембраны, а также их гидрофильных свойств. К ним относятся модификация поверхности, использование новых материалов и применение специальных технологических процессов. Модификация поверхности – очень распространенный метод уменьшения загрязнения мембран [59]. Для модификации ОО-мембран различных типов используются различные химические вещества/полимеры (например, полиамид и полиэфирсульфон). Наиболее часто используются полиамидные мембраны [49].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышенный уровень минерализации и кислотности исходного раствора негативно влияет на протекание процесса обратноосмотического разделения. С одной стороны требуется создание высокого рабочего давления, которое должно превышать осмотическое давление раствора, с другой стороны возникает необходимость очистки и регенерации мембранных поверхностей, что может приводить к деструкции материала мембраны. Смягчение условий эксплуатации обратноосмотических мембран возможно с помощью предварительной подготовки водных растворов. Предварительная очистка исходных растворов от механических примесей широко применяется в

современных ОО аппаратах. Предварительное снижение уровня соледоудержания и нормализации уровня кислотности позволит увеличить продолжительность циклов разделения между регенерациями и срок службы ОО мембран. Одним из наиболее ресурсосберегающих методов удаления из водных растворов неорганических растворимых компонентов является электродиализное разделение. С помощью предварительного электродиализного разделения возможно значительно снизить концентрацию электролитов в водном растворе, что повлечет снижение требуемого рабочего давления в ОО аппарате.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gamper-Rabindran S., Finger S. R. Does industry self-regulation reduce pollution? Responsible Care in the chemical industry // *Journal of Regulatory Economics*. – 2013. – Т.43, №1. – С.1-30.
2. Awaleh M. O., Soubaneh Y. D. Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies // *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*. – 2014. – Т.5, №1. – С.1-12.
3. Nasr F. A., Doma H. S., Abdel-Halim H. S., El-Shafai S. A. Chemical industry wastewater treatment // *The Environmentalist*. – 2007. – Т.27, №2. – С.275-286.
4. Ahmedzeki N. S., Abdullah S. M., Salman R. H. Treatment of Industrial Waste Water Using Reverse Osmosis Technique // *Journal of Engineering*. – 2009. – Т.15, №4. – С.4356-4363.
5. Akamatsu K., Kagami Y., Nakao S.-i. Effect of BSA and sodium alginate adsorption on decline of filtrate flux through polyethylene microfiltration membranes // *Journal of Membrane Science*. – 2020. – Т.594. – С.1-6.
6. Jyothi M. S., Yadav S., Balakrishna G. Effective recovery of acids from egg waste incorporated PSF membranes: A step towards sustainable development // *Journal of Membrane Science*. – 2018. – Т.549. – С.227-235.
7. Liu C., Liu Y., Guo Y., Wang C., Hu Z., Zhang C. High-hydrophilic and salt rejecting PA-g/co-PVP RO membrane via bionic sand-fixing grass for pharmaceutical wastewater treatment // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Т.357. – С.269-279.
8. Okamoto Y., Lienhard J. H. How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review // *Desalination*. – 2019. – Т.470. – С.1-21.
9. Andes K., Bartels C.R., Liu E., Sheehy N. Methods for Enhanced Cleaning of Fouled RO Elements // *The International Desalination Association (IDA) World Congress on Desalination and Water Reuse*. – 2013. – С.1-13.
10. Venzke C. D., Rodrigues M. A. S., Giacobbo A., Bacher L. E., Lemmert I. S., Viegas, C., Striving, J., Pozzebon, S. Application of reverse osmosis to petrochemical industry wastewater treatment aimed at water reuse // *Management of Environmental Quality*. – 2017. – Т.28, №1. – С.70-77.
11. Kumar M. R., Koushik C.V., Saravanan K. Textile wastewater treatment using reverse osmosis and SDI // *Elixir Chem. Engg.* – 2013. – Т.54. – С.12713-12717.
12. Adnan S., Hoang M., Wang H., Bolto B., Xie Z. Recent trends in research, development and application of membrane technology in the pulp and paper industry // *Appita Journal*. – 2010. – Т.63, №3. – С.235-241.
13. Basile A., Cassano A., Rastogi N. K. 10 - Reverse osmosis in food processing // *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. – 2020. – P. 229-257.
14. Ranganathan K., Kabadgi S. Studies on Feasibility of Reverse Osmosis (Membrane) Technology for Treatment of Tannery Wastewater // *Journal of Environmental Protection*. – 2011. – Т.2. – С.37-46.
15. Álvarez J. R., Antón F. E., Álvarez-García S., Luque, S. Treatment of Aqueous Effluents from Steel Manufacturing with High

- Thiocyanate Concentration by Reverse Osmosis // *Membranes*. – 2020. – Т.10, №12. – С.1-14.
16. Abid M. F., Zablouk M. A., Abid-Alameer A. M. Experimental study of dye removal from industrial wastewater by membrane technologies of reverse osmosis and nanofiltration // *Iranian journal of environmental health science & engineering*. – 2012. – Т.9, №1. – С.1-9.
17. Esfahani B. A., Esfahani B. A., Koupaei M. S. Industrial waste water treatment by membrane systems // *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. – 2014. – Т.4. – С.1168-1177.
18. López-Ramírez J. A., Oviedo M. D. C., Alonso J. M. Q. Comparative studies of reverse osmosis membranes for wastewater reclamation // *Desalination*. – 2006. – Т.191, №1. – С.137-147.
19. Umar M., Roddick F., Fan L. Assessing the potential of a UV-based AOP for treating high-salinity municipal wastewater reverse osmosis concentrate // *Water science and technology*. – 2013. – Т.68, №9. – С.1994-1999.
20. Xiang Q., Nomura Y., Fukahori S., Mizuno T., Tanaka H., Fujiwara T. Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: a Mini Review // *Current Pollution Reports*. – 2019. – Т.5, №4. – С.294-307.
21. Abd El-Ghaffar M. A., Tieama H. A. A review of membranes classifications, configurations, surface modifications, characteristics and Its applications in water purification // *Chemical and Biomolecular Engineering*. – 2017. – Т.2, №2. – С.57-82.
22. Lilane A., Saifaoui D., Hariss S., Jenkal H., Chouiekh M. Modeling and simulation of the performances of the reverse osmosis membrane // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Т.24. – С.114-118.
23. Yokozeki A. Osmotic pressures studied using a simple equation-of-state and its applications // *Applied Energy*. – 2006. – Т.83, №1. – С.15-41.
24. Salcedo-Díaz R., García-Algado P., García-Rodríguez M., Fernández-Sempere J., Ruiz-Beviá, F. Visualization and modeling of the polarization layer in crossflow reverse osmosis in a slit-type channel // *Journal of Membrane Science*. – 2014. – Т.456. – С.21-30.
25. Hoek E. M. V., Allred J., Knoell T., Jeong B.-H. Modeling the effects of fouling on full-scale reverse osmosis processes // *Journal of Membrane Science*. – 2008. – Т.314, №1. – С.33-49.
26. Sutzkover I., Hasson D., Semiat R. Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system // *Desalination*. – 2000. – Т.131, №(1-3). – С.117-127.
27. Fritzmann C., Löwenberg J., Wintgens T., & Melin T. State-of-the-art of reverse osmosis desalination // *Desalination*. – 2007. – Т.216, №1. – С.1-76.
28. Madaeni S. S., Mansourpanah Y. Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by whey // *Desalination*. – 2004. – Т.161. – С.13-24.
29. Crook J., Hultquist R. H., Sakaji R. H., Wehner M. P. Evolution and status of California's proposed criteria for groundwater recharge with reclaimed water // *American Water Works Association Annual Conference and Exposition*. – 2002. New Orleans. USA.
30. Durham B., Bourbigot M. M., Pankratz T. Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse: operating experience in the municipal and industrial sectors // *Desalination*. – 2001. – Т.138, №1. – С.83-90.
31. Sun D., Duan X., Li W., Zhou D. Demulsification of water-in-oil emulsion by using porous glass membrane // *Journal of Membrane Science*. – 1998. – Т.146, №1. – С.65-72.
32. Arnot T. C., Field R. W., Koltuniewicz A. B. Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsions: Part II. Mechanisms and modelling of flux decline // *Journal of Membrane Science*. – 2000. – Т.169, №1. – С.1-15.
33. Xie M., Lee J., Nghiem L.D., Elimelech M. Role of pressure in organic fouling in forward osmosis and reverse osmosis // *Journal of Membrane Science*. – 2015. – Т.493, №1. – С.748-754.
34. Xie Z., Nagaraja N., Skillman L., Li D., Ho G. Comparison of polysaccharide fouling in forward osmosis and reverse osmosis separations // *Desalination*. – 2017. – Т.402. – С.174-184.

35. Yu Y., Lee S., Maeng S.K. Forward osmosis membrane fouling and cleaning for wastewater reuse // *Journal of Water Reuse and Desalination*. – 2016. – Т.7, №2. – С.111-120.
36. Tow E. W., Rencken M. M., Lienhard J. H. In situ visualization of organic fouling and cleaning mechanisms in reverse osmosis and forward osmosis // *Desalination*. – 2016. – Т.399. – С.138-147.
37. Tang F., Hu H.-Y., Sun L.-J., Wu Q.-Y., Jiang Y.-M., Guan Y.-T., Huang, J.-J. Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: Autopsy results from a full-scale plant // *Desalination*. – 2014. – Т.349. – С.73-79.
38. Kwan S. E., Bar-Zeev E., Elimelech M. Biofouling in forward osmosis and reverse osmosis: Measurements and mechanisms // *Journal of Membrane Science*. – 2015. – Т.493. – С.703-708.
39. Lin H., Zhang M., Wang F., Meng F., Liao B.-Q., Hong H., Chen J., Gao W. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies // *Journal of Membrane Science*. – 2014. – Т.460. – С.110-125.
40. Greenlee L. F., Lawler D. F., Freeman B. D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges // *Water Research*. – 2009. – Т.43, №9. – С.2317-2348.
41. She Q., Wang R., Fane A. G., Tang C. Y. Membrane fouling in osmotically driven membrane processes: A review // *Journal of Membrane Science*. – 2016. – Т.499. – С.201-233.
42. Jin X., Jawor A., Kim S., Hoek E. M. V. Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes // *Desalination*. – 2009. – Т.239, №1. – С.346-359.
43. Pandey S. R., Jegatheesan V., Baskaran K., Shu L. Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: A review // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2012. – Т.11, №2. – С.125-145.
44. Alsally Q. F., Albyati T. M., Zablouk M. A. A. Study of The Effect of Operating Conditions on Reverse Osmosis Membrane Performance with And Without Air Sparging Technique // *Chemical Engineering Communications*. – 2013. – Т.200, №1. – С.1-19.
45. Mohammadi T., Kazemi Moghadam M., Madaeni S. S. Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during reverse osmosis of seawater // *Desalination*. – 2003. – Т.151, №3. – С.239-245.
46. Al-Mutaz I. S., Al-Ghunaimi M. A. Performance of Reverse Osmosis Units at High Temperatures // *The IDA world congress on desalination and water reuse*. – 2001. – С.26-31.
47. Franks R., Oceanside C., Nagghappan L. Performance of a reverse osmosis system when reclaiming high pH-high temperature wastewater // *American Water Works Association Membrane Technology Conference*. Memphis. – 2009.
48. Jeong S., Kim S.-J., Hee Kim L., Seop Shin M., Vigneswaran S., Vinh Nguyen T., Kim I. S. Foulant analysis of a reverse osmosis membrane used pretreated seawater // *Journal of Membrane Science*. – 2013. – Т.428. – С.434-444.
49. Jiang S., Li Y., Ladewig B. P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science of The Total Environment*. – 2017. – Т.595. – С.567-583.
50. Ochando-Pulido J. M., Victor-Ortega M. D., Martínez-Ferez A. On the cleaning procedure of a hydrophilic reverse osmosis membrane fouled by secondary-treated olive mill wastewater // *Chemical Engineering Journal*. – 2015. – Т.260. – С.142-151.
51. Singh, V., Das, A., Das, C., Pugazhenth, G., Srinivas, M., Senthilmurugan, S. Fouling and cleaning characteristics of reverse osmosis (RO) membranes // *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. – 2015. – Т.6, №4. – С.1-6.
52. Varin K. J., Lin N. H., Cohen Y. Biofouling and cleaning effectiveness of surface nanostructured reverse osmosis membranes // *Journal of Membrane Science*. – 2013. – Т.446. – С.472-481.
53. Gan Q., Howell J. A., Field R. W., England R., Bird M. R., McKechnie, M. T. Synergetic cleaning procedure for a ceramic membrane fouled by beer microfiltration // *Journal of Membrane Science*. – 1999. – Т.155, №2. – С.277-289.
54. Filloux E., Wang J., Pidou M., Gernjak W., Yuan Z. Biofouling and scaling control of reverse osmosis membrane using one-step cleaning-potential of acidified nitrite solution as an agent // *Journal of Membrane Science*. – 2015. – Т.495. – С.276-283.
55. Sohrabi M. R., Madaeni S. S., Khosravi M., Ghaedi, A. M. Chemical cleaning of reverse osmosis and nanofiltration membranes fouled by licorice aqueous solutions // *Desalination*. – 2011. – Т.267, №1. – С.93-100.
56. Masse, L., Puig-Bargués, J., Mondor, M., Deschênes, L., Talbot, G. The Efficiency of EDTA+ SDS Solutions to Clean RO Membranes Processing Swine Wastewater // *7th IWA Specialised Conference and Exhibition on Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment*. Toronto: IWA Publishing. – 2013.
57. Saqib J., Aljundi I. H. Membrane fouling and modification using surface treatment and layer-by-layer assembly of polyelectrolytes: State-of-the-art review // *Journal of Water Process Engineering*. – 2016. – Т.11. – С.68-87.
58. Malaeb L., Ayoub G. M. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review // *Desalination*. – 2011. – Т.267, №1. – С.1-8.
59. Jee K., Shin D. H., Lee Y. T. Surface modification of polyamide RO membrane for improved fouling resistance // *Desalination*. – 2016. – Т.394. – С.131-137.

Джубари Мохаммед Кадер – аспирант, кафедры технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет, тел. 89156679120, e-mail: mohammedqader1983@gmail.com.

Алексеева Надежда Вячеславовна – доцент, кафедры технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет, тел. 89051203384, e-mail: alexejewa.nadja@gmail.com.

REVERSE OSMOSIS TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT: STATE OF THE PROBLEM AND CONTROL OF MEMBRANE FOULING

M.Q. Gubari, N.V. Alekseeva

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

Abstract - Many industries produce large volumes of wastewater on a daily basis containing organic compounds, inorganic salts and suspended impurities. An integral part of modern industrial treatment facilities is a membrane cleaning system. The application area of membrane separation processes is limited by a number of requirements: the absence of suspended particles in the treated aqueous solutions, there are a number of limitations in the acidity and temperature of the separated solutions. One of the most important concerns in ensuring the cost-effectiveness of the entire processing process is the long membrane life, which can be achieved by preventing fouling of the membrane surface. The most common water treatment process is the reverse osmosis separation process. The paper considers the process of sedimentation on reverse osmosis membranes, with special attention paid to chemical cleaning. The analysis of works devoted to the issue of fouling of reverse osmosis membranes in various solutions is carried out. Various designs of membrane elements are considered, the mechanism of transfer through a reverse osmosis membrane is described, taking into account the phenomena of concentration polarization at the membrane surface. Various methods for controlling membrane fouling in industrial wastewater are described in detail: pretreatment, membrane cleaning and surface modification. The authors summarize that the composition of the initial solution is an important factor affecting the performance of a reverse osmosis system. In addition, the pretreatment of aqueous solutions before the reverse osmosis separation process leads to a decrease in fouling of the membrane surface and significantly increases the service life of the membrane element. It is effective to use an ultrafiltration separation process as a pretreatment process.

Index terms: membrane fouling, reverse osmosis, membrane transport, industrial wastewater.

REFERENCES

1. Gamper-Rabindran S., Finger S. R. Does industry self-regulation reduce pollution? Responsible Care in the chemical industry. *Journal of Regulatory Economics*, 2013, vol.43, no.1, pp.1-30.
2. Awaleh M. O., Soubaneh Y. D. Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*, 2014, vol.5, no.1, pp. 1-12.
3. Nasr F. A., Doma H. S., Abdel-Halim H. S. El-Shafai S. A. Chemical industry wastewater treatment. *The Environmentalist*, 2007, vol.27, no.2, pp.275-286.
4. Ahmedzeki N. S., Abdullah S. M., Salman R. H. Treatment of Industrial Waste Water Using Reverse Osmosis Technique. *Journal of Engineering*, 2009, vol.15, pp.4356-4363.
5. Akamatsu K., Kagami Y., Nakao S.-i., Effect of BSA and sodium alginate adsorption on decline of filtrate flux through polyethylene microfiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 2020, vol.594, pp.1-6.
6. Jyothi M. S., Yadav S., Balakrishna G., Effective recovery of acids from egg waste incorporated PSf membranes: A step towards sustainable development. *Journal of Membrane Science*, 2018, vol.549, pp.227-235.
7. Liu C., Liu Y., Guo Y., Wang C., Hu Z., Zhang C. High-hydrophilic and salt rejecting PA-g/co-PVP RO membrane via bionic sand-fixing grass for pharmaceutical wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol.357, pp.269-279.
8. Okamoto Y., Lienhard J. H. How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review. *Desalination*, 2019, vol.470, pp.1-21.
9. Andes K., Bartels C. R., Liu E., Sheehy N. Methods for Enhanced Cleaning of Fouled RO Elements. *The International Desalination Association (IDA) World Congress on Desalination and Water Reuse*, 2013, pp.1-13.
10. Venzke C. D., Rodrigues M. A. S., Giacobbo A., Bacher L. E., Lemmert I. S., Viegas, C., Striving, J., Pozzebon, S. Application of reverse osmosis to petrochemical industry wastewater treatment aimed at water reuse. *Management of Environmental Quality*, 2017, vol.28, no.1, pp.70-77.
11. Kumar M. R., Koushik C.V., Saravanan K. Textile wastewater treatment using reverse osmosis and SDI. *Elixir Chem. Engg*, 2013, vol.54, pp.12713-12717.
12. Adnan S., Hoang M., Wang H., Bolto B., Xie Z. Recent trends in research, development and application of membrane technology in the pulp and paper industry. *Appita Journal*, 2010, vol.63, no.3, pp.235-241.
13. Cassano A., Rastogi N. K., Basile A., 10 - Reverse osmosis in food processing. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, 2020, pp.229-257.
14. Ranganathan K., Kabadgi S. Studies on Feasibility of Reverse Osmosis (Membrane) Technology for Treatment of Tannery Wastewater. *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol.2, pp.37-46.
15. Álvarez, J. R., Antón, F. E., Álvarez-García, S., Luque, S. Treatment of Aqueous Effluents from Steel Manufacturing with High Thiocyanate Concentration by Reverse Osmosis. *Membranes*, 2020, vol.10, no.12, pp.1-14.
16. Abid M. F., Zablouk M. A., Abid-Alameer A. M. Experimental study of dye removal from industrial wastewater by membrane technologies of reverse osmosis and nanofiltration. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 2012, vol.9, no.1, pp.1-9.
17. Esfahani B. A., Esfahani B. A., Koupaei M. S. Industrial waste water treatment by membrane systems. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 2014, vol.4, pp.1168-1177.
18. López-Ramírez J. A., Oviedo M. D. C., Alonso J. M. Q. Comparative studies of reverse osmosis membranes for wastewater reclamation. *Desalination*, 2006, vol.191, no.1, pp.137-147.

19. Umar M., Roddick F., Fan L. Assessing the potential of a UV-based AOP for treating high-salinity municipal wastewater reverse osmosis concentrate. *Water science and technology*, 2013, vol.68, no.9, pp.1994-1999.
20. Xiang Q., Nomura Y., Fukahori S., Mizuno T., Tanaka H., Fujiwara T. Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: a Mini Review. *Current Pollution Reports*, 2019, vol.5, no.4, pp.294-307.
21. Abd El-Ghaffar M. A., Tieama H. A. A review of membranes classifications, configurations, surface modifications, characteristics and Its applications in water purification. *Chemical and Biomolecular Engineering*, 2017, vol.2, no.2, pp.57-82.
22. Lilane A., Saifaoui D., Hariss S., Jenkal H., Chouiekh M. Modeling and simulation of the performances of the reverse osmosis membrane. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol.24, pp.114-118.
23. Yokozeki A. Osmotic pressures studied using a simple equation-of-state and its applications. *Applied Energy*, 2006, vol.83, no.1, pp.15-41.
24. Salcedo-Díaz R., García-Algado P., García-Rodríguez M., Fernández-Sempere J., Ruiz-Beviá, F. Visualization and modeling of the polarization layer in crossflow reverse osmosis in a slit-type channel. *Journal of Membrane Science*, 2014, vol.456, pp.21-30.
25. Hoek E. M. V., Allred J., Knoell T., Jeong B.-H. Modeling the effects of fouling on full-scale reverse osmosis processes. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol.314, no.1, pp.33-49.
26. Sutzkover I., Hasson D., Semiat R. Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system. *Desalination*, 2000, vol.131, no.(1-3), pp.117-127.
27. Fritzmann C., Löwenberg J., Wintgens T., Melin T. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 2007, vol.216, no.1, pp.1-76.
28. Madaeni S. S., Mansourpanah Y. Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by whey. *Desalination*, 2004, vol.161, pp.13-24.
29. Crook J., Hultquist R. H., Sakaji R. H., Wehner M. P. Evolution and status of California's proposed criteria for groundwater recharge with reclaimed water. *American Water Works Association Annual Conference and Exposition*, 2002. New Orleans. USA.
30. Durham B., Bourbigot M. M., Pankratz T. Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse: operating experience in the municipal and industrial sectors. *Desalination*, 2001, vol.138, no.1, pp.83-90.
31. Sun D., Duan X., Li W., Zhou D. Demulsification of water-in-oil emulsion by using porous glass membrane. *Journal of Membrane Science*, 1998, vol.146, no.1, pp.65-72.
32. Arnot T. C., Field R. W., Koltuniewicz A. B. Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsions: Part II. Mechanisms and modelling of flux decline. *Journal of Membrane Science*, 2000, vol.169, no.1, pp.1-15.
33. Xie M., Lee J., Nghiem L. D., Elimelech M. Role of pressure in organic fouling in forward osmosis and reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, 2015, vol.493, no.1, pp.748-754.
34. Xie Z., Nagaraja N., Skillman L., Li D., Ho G. Comparison of polysaccharide fouling in forward osmosis and reverse osmosis separations. *Desalination*, 2017, vol.402, pp.174-184.
35. Yu Y., Lee S., Maeng S. K. Forward osmosis membrane fouling and cleaning for wastewater reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2016, vol.7, no.2, pp.111-120.
36. Tow E. W., Rencken M. M., Lienhard J. H. In situ visualization of organic fouling and cleaning mechanisms in reverse osmosis and forward osmosis. *Desalination*, 2016, vol.399, pp.138-147.
37. Tang F., Hu H.-Y., Sun L.-J., Wu Q.-Y., Jiang Y.-M., Guan Y.-T., Huang, J.-J. Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: Autopsy results from a full-scale plant. *Desalination*, 2014, vol.349, pp.73-79.
38. Kwan S. E., Bar-Zeev E., Elimelech M. Biofouling in forward osmosis and reverse osmosis: Measurements and mechanisms. *Journal of Membrane Science*, 2015, vol.493, pp.703-708.
39. Lin H., Zhang M., Wang F., Meng F., Liao B.-Q., Hong H., Chen J., Gao W. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science*, 2014, vol.460, pp.110-125.
40. Greenlee L. F., Lawler D. F., Freeman B. D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 2009, vol.43, no.9, pp.2317-2348.
41. She Q., Wang R., Fane A. G., Tang C. Y. Membrane fouling in osmotically driven membrane processes: A review. *Journal of Membrane Science*, 2016, vol.499, pp.201-233.
42. Jin X., Jawor A., Kim S., Hoek E. M. V. Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes. *Desalination*, 2009, vol.239, no.1, pp.346-359.
43. Pandey S. R., Jegatheesan V., Baskaran K., Shu L. Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: A review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2012, vol.11, no.2, pp.125-145.
44. Alsally Q. F., Albyati T. M., Zablouk M. A. A Study of The Effect of Operating Conditions on Reverse Osmosis Membrane Performance with And Without Air Sparging Technique. *Chemical Engineering Communications*, 2013, vol.200, no.1, pp.1-19.
45. Mohammadi T., Kazemi Moghadam M., Madaeni S. S. Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during reverse osmosis of seawater. *Desalination*, 2003, vol.151, no.3, pp.239-245.
46. Al-Mutaz I. S., Al-Ghunaimi M. A. Performance of Reverse Osmosis Units at High Temperatures. *The IDA world congress on desalination and water reuse*, 2001, pp.26-31.
47. Franks R., Oceanside C., Nagghappan L. Performance of a reverse osmosis system when reclaiming high pH-high temperature wastewater. *American Water Works Association Membrane Technology Conference*. Memphis, 2009.
48. Jeong S., Kim S.-J., Hee Kim L., Seop Shin M., Vigneswaran S., Vinh Nguyen T., Kim I. S. Fouling analysis of a reverse osmosis membrane used pretreated seawater. *Journal of Membrane Science*, 2013, vol.428, pp.434-444.
49. Jiang S., Li Y., Ladewig B. P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*, 2017, vol.595, pp.567-583.
50. Ochando-Pulido J. M., Victor-Ortega M. D., Martínez-Ferez A. On the cleaning procedure of a hydrophilic reverse osmosis membrane fouled by secondary-treated olive mill wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol.260, pp.142-151.
51. Singh, V., Das, A., Das, C., Pugazhenth, G., Srinivas, M., & Senthilmurugan, S. Fouling and cleaning characteristics of reverse osmosis (RO) membranes. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 2015, vol.6, no.4, pp.1-6.
52. Varin K. J., Lin N. H., Cohen Y. Biofouling and cleaning effectiveness of surface nanostructured reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 2013, vol.446, pp.472-481.
53. Gan Q., Howell J. A., Field R. W., England R., Bird M. R., McKechinie, M. T. Synergetic cleaning procedure for a ceramic membrane fouled by beer microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 1999, vol.155, no.2, pp.277-289.
54. Filloux E., Wang J., Pidou M., Gernjak W., Yuan Z. Biofouling and scaling control of reverse osmosis membrane using one-step cleaning-potential of acidified nitrite solution as an agent. *Journal of Membrane Science*, 2015, vol.495, pp.276-283.

55. Sohrabi M. R., Madaeni S. S., Khosravi M., Ghaedi, A. M. Chemical cleaning of reverse osmosis and nanofiltration membranes fouled by licorice aqueous solutions. *Desalination*, 2011, vol.267, no.1, pp.93-100.
56. Masse, L., Puig-Bargués, J., Mondor, M., Deschênes, L., & Talbot, G. The Efficiency of EDTA+ SDS Solutions to Clean RO Membranes Processing Swine Wastewater. 7th IWA Specialised Conference and Exhibition on Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment. Toronto: IWA Publishing, 2013.
57. Saqib J., Aljundi I. H. Membrane fouling and modification using surface treatment and layer-by-layer assembly of polyelectrolytes: State-of-the-art review. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, vol.11, pp.68-87.
58. Malaeb L., Ayoub G. M. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination*, 2011, vol.267, no.1, pp.1-8.
59. Jee K., Shin D. H., Lee Y. T. Surface modification of polyamide RO membrane for improved fouling resistance. *Desalination*, 2016, vol.394, pp.131-137.

Gubari Mohammed Qader – Postgraduate Student, Technological Processes Devices and Technosphere Safety Department, Tambov State Technical University, tel: 89156679120, e-mail: mohammedqader1983@gmail.com.

Alekseeva Nadezda Vyacheslavovna – Associate Professor, Technological Processes Devices and Technosphere Safety Department, Tambov State Technical University, tel: 89051203384, e-mail: alexejewa.nadja@gmail.com.