Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.76.71.010

УДК 628.16.081.32:544.72

О.У. Гапурова, В.Б. Наумовский, И.Г. Галиулин, И.Т. Гарипов, Р.Р. Хайдаров

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ БИОЦИДНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ

Аннотация. Рассмотрены технологические аспекты создания биоцидных обратноосмотических мембран для очистки и опреснения солоноватых артезианских, сточных и оборотных вод. Отработаны три способа поверхностной модификации промышленных полиамидных мембран: адсорбция ионов металла с последующим восстановлением боргидридом натрия; формирование на поверхности мембраны комплекса металла с катионным полиэлектролитом; нанесение предварительно синтезированных коллоидных частиц. Получены четыре образца мембран, содержащих наночастицы серебра, меди, оксида меди и биметаллические наночастицы Cu–Ag. Все модифицированные образцы проявили выраженный бактерицидный эффект; наилучшее сочетание биоцидной активности и сохранения транспортных характеристик обеспечивают мембраны с наночастицами Cu–Ag (снижение производительности не более 1 %). На их основе изготовлены опытно-промышленные образцы блочно-модульной системы опреснения, внедрённые на ряде объектов Республики Узбекистан.

Ключевые слова: обратный осмос, полиамидная мембрана, биообрастание, биоплёнка, наночастицы серебра и меди, биметаллические наночастицы, полигексаметиленбигуанидин, полиэтиленимин, опреснение воды.

Для цитирования: Технологические аспекты создания биоцидных мембран для очистки и опреснения воды / О.У. Гапурова, В.Б. Наумовский, И.Г. Галиулин, И.Т. Гарипов, Р.Р. Хайдаров // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып. 3. С. 720 – 740. DOI: 10.35634/UdSU.2026.76.71.010

Введение

В Узбекистане для очистки природных и сточных вод широко применяются установки опреснения, основанные на методе обратного осмоса [1–6]. Они незаменимы при организации питьевого водоснабжения в районах с повышенной минерализацией воды, при снабжении вахтовых посёлков нефтегазовых месторождений, а также при развёртывании локальных систем

водоснабжения на объектах, использующих воды, не отвечающие требованиям O‘z DSt 950:2011. Обратноосмотические установки используются и для технологических нужд предприятий пищевой и фармацевтической промышленности, энергетики, химии и нефтехимии [2, 4–6].

Расширение областей применения мембранных технологий повышает требования к мембранам [7–16]. Основной проблемой является снижение производительности и ресурса фильтров вследствие образования на их поверхности осадков, причём бактериальные загрязнения вызывают больше затруднений, чем коллоидные или кристаллические. Даже после предварительной обработки, удаляющей 99,9 % микроорганизмов, остаётся достаточно клеток, способных колонизировать мембранный модуль. Прикрепившись к поверхности, бактерии размножаются и выделяют внеклеточные полимерные вещества, образуя вязкий гидратированный гель, защищающий клетки от гидравлического сдвига и от воздействия биоцидов, таких как хлор. Отсутствие контроля за ростом биоплёнки приводит к биообрастанию модулей и нарушению работы системы [7–12], а применяемые против него сильные дезинфектанты вызывают деструкцию полимерной мембраны и коррозию оборудования [7, 8].

Эффективного метода непрерывной инактивации бактерий внутри мембранного модуля в процессе опреснения не существует: полиамидный селективный слой высокочувствителен к обычно используемым окислителям – хлору, его производным и озону. Альтернативой является применение мембран с собственной бактерицидной активностью. Анализ способов модификации полимерных мембран [3, 5, 13–16] показывает, что наиболее универсальны физико-химические методы модификации поверхности, причём предпочтительны реагенты, не ухудшающие санитарно-гигиенические свойства мембран. Поскольку мембраны с антибактериальными свойствами

в промышленном масштабе не выпускаются [9, 16], наиболее перспективна модификация уже существующих промышленных мембран. Разрабатываемые методы должны отвечать требованиям простоты оборудования, экологической безопасности и низкой энергоёмкости и не должны заметно ухудшать селективность и производительность, изменять структуру пор и повышать себестоимость.

Цель работы – разработка технологических приёмов придания биоцидных свойств промышленным обратноосмотическим полиамидным мембранам путём формирования на их поверхности наночастиц серебра, меди, оксида меди и биметаллических наночастиц Cu–Ag, оценка эксплуатационных характеристик полученных мембран и их реализация в составе блочно-модульной системы опреснения воды.

Материалы и методы

Реактивы. Азотнокислое серебро (х.ч.); безводный сульфат меди (II) (х.ч.); азотнокислая медь (II) (х.ч.); катионные полиэлектролиты – полиэтиленимин (ПЭИ) и полигексаметиленбигуанидин (ПГМБ, «Вантоцил»). Восстановителем служил боргидрид натрия (х.ч.), водные растворы которого готовили непосредственно перед реакцией на охлаждённой воде (10 °C).

Подготовка образцов. Торцевые части рулонного элемента спиливали алмазным диском, стекловолоконный корпус разрезали по длине и извлекали рулон полиамидной мембраны, из которого вырезали образцы 10×15 см. При модификации мембрану помещали между стеклянной пластиной и резиновой рамкой, удерживающей растворы на активном слое.

Способы модификации. Технологический процесс включает приготовление модифицирующего раствора, обработку им мембраны и её отмывку. Первый способ – адсорбция серебра или меди при контакте поверхности мембраны с раствором соли с последующим восстановлением

закреплённых ионов боргидридом натрия. Второй – получение на поверхности мембраны полимерного комплекса металла с катионным полиэлектролитом (ПЭИ или ПГМБ) с последующим восстановлением; полиэлектролиты присоединяются к полиамиду за счёт водородных связей и электростатического взаимодействия положительно заряженного комплекса Ме–ПЭИ (Ме–ПГМБ) с карбоксильными и карбонильными группами полиамида. Третий – получение коллоидных частиц в растворе и последующее нанесение их на поверхность мембраны.

Определение производительности. Измеряли объём воды, прошедшей через плоскую мембрану за заданное время при постоянном давлении, на лабораторной фильтрационной установке с водоструйным насосом и колбой Бунзена; мембраны в форме диска помещали в воронку Бюхнера. Использовали модельную воду, характерную для Хорезмской области (Республика Узбекистан): сухой остаток 1,6 г/л; общая жёсткость 17,5 мг-экв/л; сульфаты 865 мг/л; хлориды 39 мг/л; бикарбонаты 195 мг/л.

Оценка бактерицидных свойств проводилась по способности мембран задерживать рост условно-патогенной флоры. В качестве тест-культур использовали *Escherichia coli* (количественная оценка), а также *Staphylococcus aureus* и микромицеты родов *Aureobasidium* и *Penicillium* (визуальная оценка зоны роста). Через каждую испытуемую и контрольную мембрану пропускали по 50 мл раствора тест-культуры с концентрацией $1 \cdot 10^3$ КОЕ/см³, после чего образцы переносили на питательную среду в чашках Петри поверхностью с отфильтрованными бактериями вверх. Посевы инкубировали при 37 °C в течение 7 суток; число выросших колоний подсчитывали через 12, 24, 48 и 72 ч.

Оборудование. Магнитная мешалка MS-H280, сушильный шкаф FAITHFUL GX 85 B, аналитические весы, центрифуга. Структурные

исследования выполнены на оборудовании ИЯФ АН РУз (дифрактометр Empyrean Malvern Panalytical, зондовый микроскоп SH 9700 HT, спектрофотометр UV-3600 Plus, спектрофлюориметр Cary Eclipse); электронно-микроскопические снимки получены в лаборатории Сибирского федерального университета (Россия).

Результаты и обсуждение

1. Модифицирование наночастицами серебра

Использование наночастиц серебра – новый подход к антибактериальной обработке материалов [15, 17]. Уже при концентрации 0,1 мг/л серебро обладает выраженным фунгицидным действием, превосходящим при равных концентрациях действие хлора, хлорной извести и гипохлорита натрия, а наноразмерное состояние дополнительно повышает бактерицидную активность за счёт большой удельной площади поверхности. Механизм воздействия включает три стадии: проникновение серебра в оболочку микроорганизма с разрушением клеточных перегородок; взаимодействие с энзимами и дезактивацию жизнеспособных молекул; взаимодействие с ДНК клетки, предотвращающее её репродукцию [17, 18]. Ввиду стоимости серебра его применение в чистом виде нецелесообразно, поэтому изучалось совместное использование с органическим полимером, обладающим одновременно стабилизирующим и антимикробным действием. Таким полимером является ПГМБ – катионный полиэлектролит, применяемый для обеззараживания воды. Механизм действия поликатионов заключается в связывании с кислыми фосфолипидами клеточных мембран микроорганизмов, что нарушает обмен внутриклеточных веществ с внешней средой. ПГМБ обладает антибактериальной, фунгицидной и вирулицидной активностью с пролонгированным эффектом, малотоксичен и не является аллергеном;

биоцидные свойства обеспечиваются гидрофильной гуанидиновой группировкой в звеньях макромолекул, а гидрофобная углеводородная цепочка облегчает проникновение антисептика внутрь микробной клетки.

Восстановление солей серебра боргидридом натрия наиболее распространено вследствие высокой реакционной способности восстановителя и его невысокой токсичности по сравнению с гидразином и гидроксиламином [19]. Размер частиц и устойчивость золей зависят от концентрации реагентов, последовательности их добавления и кислотности среды. Коллоидный раствор серебра получали добавлением по каплям при перемешивании 10 мл 0,01 %-го раствора ПГМБ к 50 мл раствора нитрата серебра концентрацией $2{,}5\cdot10^{-4}$ моль/л с последующим восстановлением боргидридом натрия концентрацией $1\cdot10^{-2}$ моль/л (расход 3 мл) при 25 ± 5 °C по реакции (1):

$$2AgNO_3 + 2NaBH_4 + 6H_2O = 2NaNO_3 + 2H_3BO_3 + 7H_2\uparrow + 2Ag^0 \quad (1)$$

Модификацию поверхности мембраны проводили следующим образом. На мембрану приливали 20 мл раствора нитрата серебра концентрацией $5\cdot10^{-2}$ моль/л и выдерживали 15 мин, после чего раствор сливали, оставляя на поверхности тонкий слой соли. К закреплённым ионам серебра приливали 10 мл 0,1 %-го раствора ПГМБ с образованием комплекса Ag–ПГМБ; восстановление вели раствором боргидрида натрия концентрацией $1\cdot10^{-2}$ моль/л, затем мембрану промывали дистиллированной водой 15 с. Все операции выполняли при 23–25 °C; полученный образец № 1 помещали в закрытую ёмкость.

2. Модифицирование наночастицами меди и оксида меди

Формирование наночастиц серебра непосредственно на поверхности мембраны технологически просто, однако стоимость серебра увеличивает эксплуатационные расходы. Медь существенно дешевле и широко используется как консервант, фунгицид и дезинфицирующее средство, а также

как основной компонент противообрастающих красок; известно применение медьсодержащих солей в качестве антиобрастателей при опреснении воды. Наиболее простой способ получения наночастиц меди — восстановление ионов меди (II) в водных растворах боргидридом натрия [20]. К 20 мл раствора сульфата меди с концентрациями $1 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л приливали по 1 мл боргидрида натрия концентрацией 0,1 моль/л. Сразу после введения восстановителя наблюдалась розово-красная окраска, свидетельствующая об образовании наночастиц металлической меди; со временем концентрация восстановителя снижается, и частицы окисляются кислородом воздуха с образованием металлического ядра, покрытого оксидами меди (I) и (II). В серии опытов с варьированием концентрации восстановителя максимальный выход наночастиц и их устойчивость достигнуты при концентрации боргидрида натрия 0,1 моль/л: при меньшей концентрации образуются жёлтые растворы, содержащие, по-видимому, частицы Cu_2O, при большей – чёрный осадок. Оптимальными признаны концентрации сульфата меди $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л и боргидрида натрия 0,1 моль/л.

Модифицирование поверхности мембраны проводили приливанием 15 мл раствора сульфата меди концентрацией $5 \cdot 10^{-2}$ моль/л с выдержкой 10 мин; после слива раствора оставшийся тонкий слой соли восстанавливали раствором боргидрида натрия концентрацией $3 \cdot 10^{-2}$ моль/л в течение 15 мин, затем мембрану промывали дистиллированной водой 10 с (образец № 2). Количественное определение меди вымыванием азотной кислотой (0,1 мл 60 %-ной HNO_3 + 10 мл воды) дало содержание порядка 15 мкг/см². Предположительно при контакте раствора меди с поверхностью мембраны образуются комплексы ионов меди с карбонильными и аминовыми группами, а при восстановлении протекает реакция (2):

$$Cu^{2+} + 2BH_4^- + 6H_2O \rightarrow Cu^0 + 2B(OH)_3 + 7H_2\uparrow \quad (2)$$

Цвет мембраны при этом медленно менялся на тёмно-коричневый, дополнительно темнея при окислении кислородом воздуха. Вся процедура выполнялась в условиях окружающей среды без перемещения мембраны, что позволяет получать наночастицы меди непосредственно в опреснительной установке без демонтажа мембранного модуля. Существенно, что при нормальных условиях боргидрид натрия не восстанавливает амидные и карбоновые группы, составляющие основу селективного полиамидного слоя, поэтому риск повреждения мембраны минимален.

3. Модифицирование наночастицами меди в присутствии полиэтиленимина

В качестве стабилизатора, предотвращающего агрегацию наночастиц и придающего положительный заряд их поверхности, использовали ПЭИ. Разветвлённый ПЭИ содержит первичные, вторичные и третичные аминные группы в соотношении 1:2:1 [21]; их протонирование обеспечивает положительный заряд в широком диапазоне pH и электростатическое притяжение к отрицательно заряженным карбоксильным группам поверхности мембраны, а атомы азота образуют высокостабильные хелатные комплексы с ионами меди (II) [22]. Благодаря этому связывание наночастиц с поверхностью сводится к погружению мембраны в раствор; тот же приём может использоваться для дозагрузки наночастиц после их частичного растворения в процессе эксплуатации.

К 10 мл раствора сульфата меди концентрацией $5\cdot10^{-2}$ моль/л приливали 30 мл 0,1 %-го раствора ПЭИ; комплексообразование аминных групп с ионами меди сопровождается изменением окраски от голубой до тёмно-синей. Раствор перемешивали 5 мин при 200 об/мин, вводили 10 мл раствора боргидрида натрия концентрацией $3\cdot10^{-2}$ моль/л и перемешивали ещё 10 мин; полученную

суспензию трижды промывали дистиллированной водой на центрифуге при 5000 об/мин. Особенности восстановления определяются только составом исходного раствора: при избытке ПЭИ восстановление не происходит, при большом избытке свободных ионов меди образуются чёрные хлопьевидные осадки, а при небольшом их избытке получаются устойчивые дисперсии тёмно-коричневого цвета.

Мембрану погружали в суспензию на 24 ч; предварительно суспензию обрабатывали ультразвуком 15 мин для диспергирования агрегатов Cu·ПЭИ. После выдержки мембрану промывали дистиллированной водой 15 с, высушивали при комнатной температуре и помещали в закрытую ёмкость (образец № 3).

4. Модифицирование биметаллическими наночастицами Cu–Ag

Перспективны полимеры, содержащие наночастицы со структурой «ядро–оболочка» – ядро недорогого металла, покрытое более благородным металлом [23]. Такие частицы сокращают расход драгоценного металла и обладают свойствами, не характерными для индивидуальных металлов [23, 24]. Существенное различие стандартных электродных потенциалов пар Cu^{2+}/Cu^{0} и Ag^{+}/Ag^{0} (0,337 и 0,799 В соответственно) обусловливает протекание реакции контактного вытеснения между коллоидной медью и ионами серебра. Использовали растворы нитрата меди: применение хлоридов и сульфатов нежелательно, поскольку при последующем введении серебра образуются малорастворимые хлорид или сульфат серебра. Для получения устойчивых коллоидных частиц применяли ПЭИ, который является одновременно комплексообразователем для ионов меди и стабилизатором наночастиц и предотвращает окисление меди до Cu_2O. Возможность протекания этих процессов проверена в модельном эксперименте на матрице катионообменника: после сорбции меди и восстановления боргидридом натрия цвет носителя

менялся от голубого до розово-красного (Cu^0), а при последующем приливании азотнокислого серебра восстановление шло самопроизвольно при комнатной температуре с формированием оболочки серебра на частицах меди либо смешанной пары Cu–Ag.

Модификация поверхности мембраны включала четыре этапа: 1) нанесение 20 мл раствора нитрата меди концентрацией $5 \cdot 10^{-2}$ моль/л с выдержкой 30 мин и последующим сливом; 2) приливание 10 мл 0,1 %-ного раствора ПЭИ с образованием комплекса Cu–ПЭИ (5 мин); 3) восстановление ионов меди раствором боргидрида натрия концентрацией $3 \cdot 10^{-2}$ моль/л со сливом остатков и промывкой водой 10 с; 4) нанесение 10 мл раствора нитрата серебра концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л с выдержкой 24 ч, сливом раствора, промывкой водой 10 с и сушкой при комнатной температуре (образец № 4).

5. Эксплуатационные и биоцидные характеристики мембран

Таким образом, поверхностной модификацией получены четыре образца, различающиеся способом обработки, которые испытывали на производительность и бактерицидность. Наибольшее падение производительности наблюдалось у образца № 3, что может быть связано с частичной блокировкой пор при нанесении модификатора в виде суспензии. Небольшое снижение (≤ 10 %) отмечено у образца № 1 и, предположительно, связано с использованием ПГМБ, обладающего большой молекулярной массой. Образцы № 2 и № 4 показали наилучшие результаты – снижение производительности не более 1 %. Результаты оценки бактерицидных свойств приведены ниже (табл. 1).

Таблица 1

Оценка бактерицидных свойств модифицированных мембран (тест-культура *E. coli*, исходная концентрация $1 \cdot 10^3$ КОЕ/см³)

Образец	**12 ч**	**24 ч**	**48 ч**	**72 ч**
Исходная мембрана (контроль)	сплошной рост	сплошной рост	сплошной рост	сплошной рост
Образец № 1 (Ag–ПГМБ)	отсутств.	отсутств.	2	4
Образец № 2 (Cu–CuO)	отсутств.	3	5	10
Образец № 3 (Cu–ПЭИ)	отсутств.	4	7	11
Образец № 4 (Cu–Ag)	отсутств.	отсутств.	1	1

Примечание – приведено число выросших на поверхности фильтра колоний, КОЕ.

Микробиологические тесты демонстрируют выраженный антимикробный эффект мембран, модифицированных наночастицами серебра и меди: на модифицированных образцах рост тест-культур практически отсутствует, тогда как вокруг исходной мембраны наблюдается сплошной рост (рис. 1). Применение биметаллических наночастиц в структуре обратноосмотических мембран позволяет предотвратить рост бактерий и биоплёнок на их поверхности и тем самым увеличить срок службы мембранных элементов.

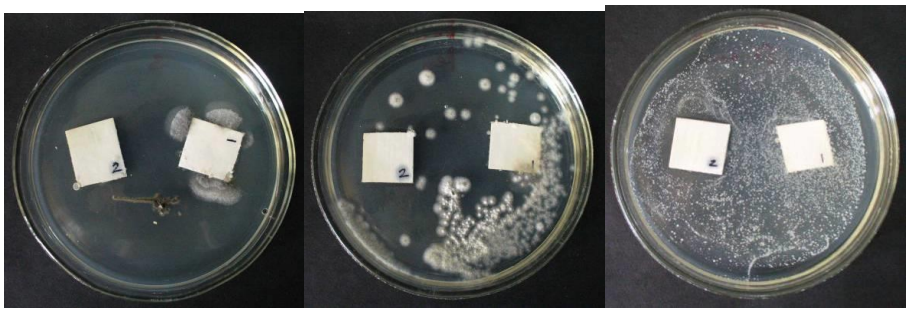


Рис. 1. Рост *Aureobasidium* (слева), *Penicillium* (в центре) и *S. aureus* (справа) на образцах обратноосмотических мембран: исходной (1) и модифицированной наночастицами серебра и меди (2) с концентрацией 0,1 ммоль/г.

Снимки, полученные на растровом и просвечивающем электронных микроскопах, показывают, что наночастицы серебра и меди располагаются на поверхности модифицированной мембраны и имеют преимущественно сферическую форму с признаками структуры «ядро–оболочка» (рис. 2, a, b); данные энергодисперсионной спектроскопии подтверждают присутствие обоих металлов (рис. 2, c). Исследования подтвердили, что оптимальным вариантом является пара Cu–Ag: она обеспечивает максимальную биоцидную активность при практически полном сохранении транспортных характеристик мембраны и минимальном расходе благородного металла.

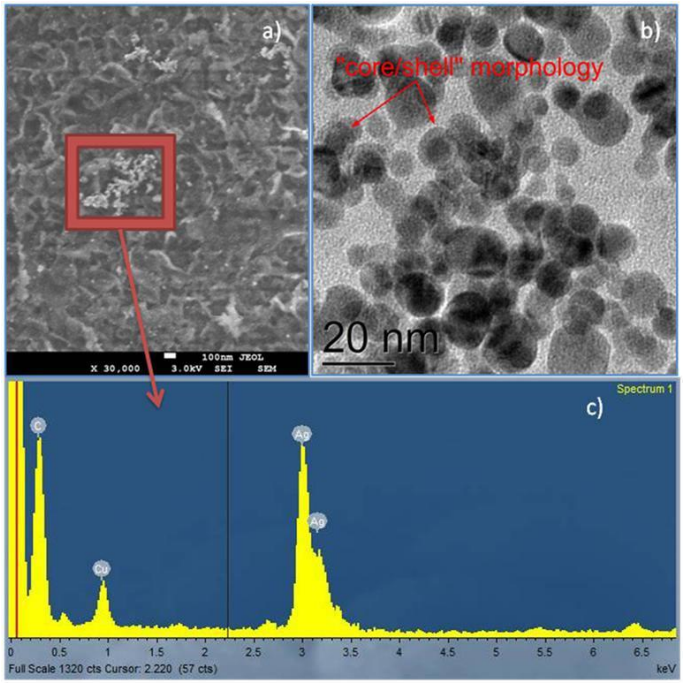


Рис. 2. Снимки биметаллических наночастиц Cu–Ag, полученные на растровом (a) и просвечивающем (b) электронном микроскопе, с данными энергодисперсионной спектроскопии (c)

6. Реализация в блочно-модульной системе опреснения

На основе разработанных мембран изготовлены опытно-промышленные образцы блочно-модульной системы опреснения воды, включающей блок

предварительной очистки (механический фильтр и умягчитель с нанокомпозитным катионитом), мембранный блок (финишный картриджный фильтр с селективностью 5 мкм и два рулонных элемента на основе мембран с наночастицами Cu–Ag), систему дозирования ингибитора осадкообразования, систему быстрой гидравлической промывки, насосное оборудование и КИПиА [25]. Технические характеристики применённых мембранных элементов приведены ниже (табл. 2).

Таблица 2

Технические характеристики обратноосмотических мембранных элементов с биметаллическими наночастицами в структуре

Наименование мембраны	**Рабочее давление, атм**	**Производительность, м³/сут**	**Селективность по NaCl, %**	**Мин. селективность, %**	**Площадь поверхности, м²**
Мембрана типоразмера 4040	7	9,8	99,3	98,5	7,9 (3,3)

Опытно-промышленные образцы системы внедрены на социальных и промышленных объектах Республики Узбекистан. На базе ГУП «КБ с ОЗ при ИЯФ АН РУз» освоено мелкосерийное производство автономных систем опреснения артезианских вод с минерализацией до 5 г/л. Отдельно следует отметить возможность питания установки от солнечных батарей. Срок окупаемости фотоэлектрических установок на рынке Узбекистана составляет около трёх лет, что с учётом стоимости электроэнергии от дизельных генераторов создаёт предпосылки для их широкого применения. Разработанные системы крайне неэнергоёмки – в них применены низконапорные мембраны и насосы невысокой мощности, – поэтому автономные малые фотоэлектрические установки способны полностью обеспечить их электроэнергией [26]. Это делает установку мобильной и пригодной для опреснения воды в труднодоступных, горных и пустынных территориях.

Заключение

1. Разработаны технологии модифицирования обратноосмотических полиамидных мембран наночастицами серебра, меди, оксида меди и биметаллическими частицами Cu–Ag с целью придания им биоцидных свойств. Все предложенные приёмы реализуются при комнатной температуре, не требуют сложного оборудования и не приводят к деструкции селективного полиамидного слоя.

2. Микробиологические испытания показали выраженный бактерицидный эффект всех полученных образцов. Наилучшее сочетание биоцидной активности и сохранения транспортных характеристик обеспечивают мембраны с биметаллическими наночастицами Cu–Ag: снижение производительности не превышает 1 % при полном подавлении роста тест-культуры в течение первых 24 ч и практически полном – в течение 48 ч.

3. Показана возможность формирования наночастиц меди непосредственно на поверхности мембраны в условиях окружающей среды без демонтажа мембранного модуля, что открывает перспективу периодической дозагрузки биоцидного компонента в процессе эксплуатации установки.

4. На основе разработанных мембран изготовлены опытно-промышленные образцы блочно-модульной системы опреснения, внедрённые на социальных и промышленных объектах Республики Узбекистан. Основным потребителем разработки являются объекты, удалённые от центрального водоснабжения и нуждающиеся в обессоливании исходной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joo S.H., Tansel B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review, Journal of Environmental Management, 2015. vol. 150, pp. 322–335.
2. Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D. et al. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today’s challenges, Water Research, 2009, ol. 43, no.9, pp. 2317–2348.

3. Lee K.P., Arnot T.C., Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination – development to date and future potential, Journal of Membrane Science, 2011, vol. 370, no 1–2, pp. 1–22.
4. Garud R.M., Kore S.V., Kore V.S. et al. A short review on process and applications of reverse osmosis, Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 233–238.
5. Sedighi M., Usefi M.M.B., Ismail A.F. et al. Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination, Desalination, 2023, vol. 549. Art. 116319.
6. Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A. et al. Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery, Membranes, 2020, vol. 10, № 7. Art. 146.
7. Xu P., Bellona C., Drewes J.E. Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: Membrane autopsy results from pilot-scale investigations, Journal of Membrane Science, 2010, vol. 353, no. 1–2, pp. 111–121.
8. Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Heijman S.G. et al. Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements, Journal of Membrane Science, 2007, vol. 287, no. 1, pp. 94–101.
9. Ingham R. High-capacity water-treatment system feeds industrial pure-water users, Membrane Technology, 2001, no. 139, pp. 10–12.
10. Humphries J.R., Wood M.S. Reverse osmosis environmental remediation. Development and demonstration pilot project, Desalination, 2004, vol. 168, pp. 177–184.
11. Arora R.C., Maheshwari S.K., Jain A. et al. Use of membrane technology for potable water production, Desalination, 2004, vol. 170, no. 2, pp. 105–112.
12. Михайлова Р.Н., Кирьянова Л.Ф., Кошелев К.К. и др. Новые гигиенические средства для подготовки, стерилизации и консервации воды и напитков // Экология человека и медико-биологическая безопасность населения: материалы научно-техн. конф. М., 2003. С. 109.
13. Alammar A., Park S.-H., Williams C.J. et al. Oil-in-water separation with graphene-based nanocomposite membranes for produced water treatment, Journal of Membrane Science, 2020, vol. 603, Art. 118007.

14. Mollahosseini A., Abdelrasoul A. Molecular dynamics simulation for membrane separation and porous materials: A current state of art review, Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2021, vol. 107, Art. 107947.
15. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial prophylaxis // Journal of Siberian Federal University. Biology, 2019, vol. 12, vol. 3, pp. 266–276.
16. Saleem H., Zaidi S.J. Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review, Desalination, 2020, vol. 475, Art. 114171.
17. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. Antimicrobial silver nanomaterials // Biocides: Uses, Exposure and Risks / K.L. Bang (Ed.). New York: Nova Science Publ., 2020, pp. 60–72.
18. Гарипов И.Т., Юлдашев А.Б., Хайдаров Р.Р. и др. Получение и применение катионита с нановключениями серебра // Управление техносферой, 2020. Т. 3, вып. 3. С. 386–400.
19. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. The application of fiber ion exchange sorbents for wastewater treatment and purification of gas mixtures, Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 10–13.
20. Ben-Sasson M., Zodrow K.R., Qi G. et al. Surface functionalization of thin-film composite membranes with copper nanoparticles for antimicrobial surface properties, Environmental Science & Technology, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 384–393.
21. Von Harpe A., Petersen H., Li Y. et al. Characterization of commercially available and synthesized polyethylenimines for gene delivery, Journal of Controlled Release, 2000, vol. 69, vol. 2, pp. 309–322.
22. Kobayashi S., Hiroishi K., Tokunoh M. et al. Chelating properties of linear and branched poly(ethylenimines), Macromolecules, 1987, vol. 20, no. 7, pp. 1496–1500.
23. Toshima N., Yonezawa T. Bimetallic nanoparticles – novel materials for chemical and physical applications, New Journal of Chemistry, 1998, vol. 22, no. 11, pp. 1179–1201.
24. Ferrando R., Jellinek J., Johnston R.L. Nanoalloys: from theory to applications of alloy clusters and nanoparticles, Chemical Reviews, 2008, vol. 108, no. 3, pp. 845–910.
25. Гарипов И.Т., Юлдашев А.Б., Абдухакимов М.К. и др. Новый импортозамещающий антискалант для мембранных систем опреснения воды // Наука и инновационное развитие, 2020. № 6. С. 103–114.

26. Yuldashev A.B., Garipov I.T., Khaydarov R.R. Direct osmotic desalination technique by solar energy, nternational Journal of Natural Resource Ecology and Management, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 84–89.

Поступила в редакцию: 30.08.2026

Сведения об авторах

Гапурова Ольга Урумбаевна
к.х.н., младший научный сотрудник, Институт ядерной физики, Академия наук Республики Узбекистан, 100214, Ташкент, Узбекистан.
Email: gapurova2011@yandex.ru

Наумовский Валерий Борисович
младший научный сотрудник, Институт ядерной физики, Академия наук Республики Узбекистан, 100214, Ташкент, Узбекистан.
Email: papa47@mail.ru

Галиулин Ильдар Галиевич
младший научный сотрудник, Институт ядерной физики, Академия наук Республики Узбекистан, 100214, Ташкент, Узбекистан.
Email: ildarg7986@gmail.com

Гарипов Ильнур Тагирович
младший научный сотрудник, Институт ядерной физики, Академия наук Республики Узбекистан, 100214, Ташкент, Узбекистан.
Email: ilnurgarif@gmail.com

Хайдаров Ренат Рашидович
к.ф.-м.н., зав. лаборатории междисциплинарных технологий, Институт ядерной физики, Академия наук Республики Узбекистан, 100214, Ташкент, Узбекистан.
Email: renat@inp.uz

O. U. Gapurova, V. B. Naumovsky, I. G. Galiulin, I. T. Garipov, R. R. Khaidarov

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATING BIOCIDAL MEMBRANES FOR WATER PURIFICATION AND DESALINATION

Annotation. The technological aspects of creating biocidal reverse osmosis membranes for the purification and desalination of brackish artesian, wastewater, and circulating waters are considered. Three methods of surface modification of industrial polyamide membranes have been developed: adsorption of metal ions followed by reduction with sodium borohydride; formation of a metal complex with a cationic polyelectrolyte on the membrane surface; application of pre-synthesized colloidal particles. Four samples of membranes containing nanoparticles of silver, copper, copper oxide, and bimetallic Cu–Ag nanoparticles were obtained. All modified samples exhibited a pronounced bactericidal effect; the best combination of biocidal activity and preservation of transport characteristics is provided by membranes with Cu–Ag nanoparticles (a decrease in productivity of no more than 1%). On their basis, pilot-industrial samples of a block-modular desalination system were manufactured and introduced at a number of facilities in the Republic of Uzbekistan.
Keywords: reverse osmosis, polyamide membrane, biofouling, biofilm, silver and copper nanoparticles, bimetallic nanoparticles, polyhexamethylene biguanide, polyethyleneimine, water desalination.

For citation: Gapurova O.U., Naumovsky V.B., Galiulin I.G., Garipov I.T., Khaidarov R.R. [Technological aspects of creating biocidal membranes for water purification and desalination]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 3, pp. 720 – 740. DOI: 10.35634/UdSU.2026.76.71.010

REFERENCES

1. Joo S.H., Tansel B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review, Journal of Environmental Management, 2015. vol. 150, pp. 322–335.
2. Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D. et al. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, Water Research, 2009, ol. 43, no.9, pp. 2317–2348.
3. Lee K.P., Arnot T.C., Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination – development to date and future potential, Journal of Membrane Science, 2011, vol. 370, no 1–2, pp. 1–22.
4. Garud R.M., Kore S.V., Kore V.S. et al. A short review on process and applications of reverse osmosis, Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 233–238.

5. Sedighi M., Usefi M.M.B., Ismail A.F. et al. Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination, Desalination, 2023, vol. 549. Art. 116319.
6. Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A. et al. Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery, Membranes, 2020, vol. 10, № 7. Art. 146.
7. Xu P., Bellona C., Drewes J.E. Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: Membrane autopsy results from pilot-scale investigations, Journal of Membrane Science, 2010, vol. 353, no. 1–2, pp. 111–121.
8. Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Heijman S.G. et al. Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements, Journal of Membrane Science, 2007, vol. 287, no. 1, pp. 94–101.
9. Ingham R. High-capacity water-treatment system feeds industrial pure-water users, Membrane Technology, 2001, no. 139, pp. 10–12.
10. Humphries J.R., Wood M.S. Reverse osmosis environmental remediation. Development and demonstration pilot project, Desalination, 2004, vol. 168, pp. 177–184.
11. Arora R.C., Maheshwari S.K., Jain A. et al. Use of membrane technology for potable water production, Desalination, 2004, vol. 170, no. 2, pp. 105–112.
12. Mikhailova R.N., Kiryanova L.F., Koshelev K.K. et al. *Novye gigienicheskie sredstva dlya podgotovki, sterilizacii i konservacii vody i napitkov* [New hygienic means for the preparation, sterilization and preservation of water and beverages], Human ecology and medical and biological safety of the population: proceedings of the scientific and technical conf. Moscow, 2003, p. 109. (In Russ.).
13. Alammar A., Park S.-H., Williams C.J. et al. Oil-in-water separation with graphene-based nanocomposite membranes for produced water treatment, Journal of Membrane Science, 2020, vol. 603, Art. 118007.
14. Mollahosseini A., Abdelrasoul A. Molecular dynamics simulation for membrane separation and porous materials: A current state of art review, Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2021, vol. 107, Art. 107947.
15. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial prophylaxis, Journal of Siberian Federal University, Biology, 2019, vol. 12, vol. 3, pp. 266–276.

16. Saleem H., Zaidi S.J. Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review, Desalination, 2020, vol. 475, Art. 114171.
17. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. Antimicrobial silver nanomaterials, Biocides: Uses, Exposure and Risks / K.L. Bang (Ed.). New York: Nova Science Publ., 2020, pp. 60–72.
18. Garipov I.T., Yuldashev A.B., Khaidarov R.R. et al. *Poluchenie i primenenie kationita s nanovklyucheniyami serebra* [Production and application of cation exchange resin with silver nanoinclusions], *Upravlenie tekhnosferoj*, 2020, vol. 3, issue 3, pp. 386–400. (In Russ.).
19. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U. et al. The application of fiber ion exchange sorbents for wastewater treatment and purification of gas mixtures, Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 10–13.
20. Ben-Sasson M., Zodrow K.R., Qi G. et al. Surface functionalization of thin-film composite membranes with copper nanoparticles for antimicrobial surface properties, Environmental Science & Technology, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 384–393.
21. von Harpe A., Petersen H., Li Y. et al. Characterization of commercially available and synthesized polyethylenimines for gene delivery, Journal of Controlled Release, 2000, vol. 69, no. 2, pp. 309–322.
22. Kobayashi S., Hiroishi K., Tokunoh M. et al. Chelating properties of linear and branched poly(ethylenimines), Macromolecules, 1987, vol. 20, no. 7, pp. 1496–1500.
23. Toshima N., Yonezawa T. Bimetallic nanoparticles – novel materials for chemical and physical applications, New Journal of Chemistry, 1998, vol. 22, no. 11, pp. 1179–1201.
24. Ferrando R., Jellinek J., Johnston R.L. Nanoalloys: from theory to applications of alloy clusters and nanoparticles, Chemical Reviews, 2008, vol. 108, no. 3, pp. 845–910.
25. Garipov I.T., Yuldashev A.B., Abdukhakimov M.K. et al. *Novyj importozameshchayushchij antiskalant dlya membrannyh sistem opresneniya vody* [New import-substituting antiscalant for membrane water desalination systems], *Nauka i innovacionnoe razvitie* [Science and innovative development], 2020, no. 6, pp. 103–114. (In Russ.).
26. Yuldashev A.B., Garipov I.T., Khaydarov R.R. Direct osmotic desalination technique by solar energy, International Journal of Natural Resource Ecology and Management, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 84–89.

Received: 30.08.2026

About the Authors

Gapurova Olga Urumbaevna
Ph.D., Junior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan.
Email: gapurova2011@yandex.ru

Naumovsky Valery Borisovich
junior researcher, Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan.
Email: papa47@mail.ru

Galiulin Ildar Galievich
junior researcher, Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan.
Email: ildarg7986@gmail.com

Garipov Ilnur Tagirovich
junior researcher, Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan.
Email: ilnurgarif@gmail.com

Khaidarov Renat Rashidovich
Candidate of Physics, Head. Laboratory of Interdisciplinary Technologies, Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan.
Email: renat@inp.uz