

Зубова О.А., Таныбаева А.К.,
Абубакирова К.Д.,
Темирбаева К.А.,
Пирниязов М.Т.

**Обзор современных
технологий опреснения
морской воды и перспективы
их развития**

В статье рассматриваются основные современные технологии промышленного опреснения морской воды, осуществляемые методами: дистилляции, обратного осмоса, электродиализа, вымораживания, ионного обмена. Даны конструкции аппаратов умягчения и опреснения морской воды, рассмотрены происходящие технологические процессы. На сегодняшний день важной задачей, стоящей как перед зарубежными странами, так и перед Казахстаном, является опреснение морской воды, очистка, водоочистка, так как даже водопроводная вода из городского водоснабжения содержит повышенное содержание солей и различных загрязнений. Для решения этой проблемы авторами выявлены экологические и экономические преимущества и недостатки возможного применения вышеперечисленных методов опреснения морских вод. Изучены перспективы широкомасштабного использования атомной энергии для опреснения морской воды, в том числе на примере Мангышлакского атомного энергетического комплекса Республики Казахстан, на котором наработан многолетний опыт ядерного опреснения. Кроме того, дан краткий обзор прогрессивных технологий, которые могут прийти на замену существующим методикам. В частности, рассмотрены методы опреснения солёной воды, основанные на ударных волнах, использовании пористого материала нанотолщины (мембраны Perforene, мембрана из дисульфида молибдена, графен) для отделения соли от воды, описаны опреснительные установки, которые работают за счет энергии солнца, по гибридной технологии, то есть сочетающие в себе термический и мембранный методы обессоливания.

Ключевые слова: дистилляция, ионный обмен, обратный осмос, электродиализ, ядерное опреснение, первапорация.

Zubova O.A., Tanybaeva A.K.,
Abubakirova K.D.,
Temirbayeva K.A.,
Pirniyazov M.T.

**Review on modern technologies
for seawater desalination and
prospects for their development**

In article considered the main modern technologies of industrial desalination of seawater, carried out by methods: distillation, reverse osmosis, electrodiagnosis, freezing, and ion exchange. It given the design of softening and desalination devices for seawater, considered technological processes occurring on them. To date, an important task facing both foreign countries and Kazakhstan is the desalination of seawater, treatment, water treatment, since even tap water from urban water supply contains an increased content of salts and various contaminants. To solve this problem, the authors have identified the ecological and economic advantages and disadvantages of the possible application of the above-listed desalination methods for seawaters. Have been studied prospects of large-scale use of atomic energy for desalination of seawater, including the example of the Mangyshlak nuclear power complex of the Republic of Kazakhstan, on which many years of experience in nuclear desalination been developed. In addition, given a brief overview of advanced technologies, which are able to come to replace existing techniques. In particular, considered the methods of desalination of salt water based on shock waves, use of porous nanotubes (Perforene membranes, molybdenum disulfide, and graphene membranes) for separation of salt from water, described desalination plants that operate at the expense of solar energy using hybrid technology, that is, combining the thermal and membrane method of desalting.

Key words: distillation, ion exchange, reverse osmosis, electrodiagnosis, nuclear desalination, pervaporation.

Зубова О.А., Таныбаева А.К.,
Абубакирова К.Д.,
Темирбаева К.А.,
Пирниязов М.Т.

**Теңіз суын тұщылаудың қазіргі
заманғы технологияларына
шолу және олардың даму
келешегі**

Мақалада дистилляция (сүзу), кері осмос, электродиализ (электрлік тазалау), суды мұздату, иондық алмасу әдістері арқылы жүзеге асырылатын теңіз суын өнеркәсіптік тұщылаудың қазіргі заманғы негізгі технологиялары қарастырылады. Теңіз суын жұмсарту мен тұщылау аппараттарының құрылымы берілген, олардағы технологиялық үдерістер қарастырылған. Қазіргі күні шет мемлекеттердің, сонымен қатар Қазақстанның алдында тұрған маңызды міндеттердің бірі теңіз суын тұщылау, тазарту болып табылады, өйткені тіпті қаланы сумен қамтитын құбыр суының құрамында мөлшерден тыс тұз бен түрлі ластаушылар бар. Бұл мәселені шешу жолында авторлар теңіз суын тұщылаудың жоғарыда келтірілген әдістерін қолданудың мүмкін болатын экологиялық және экономикалық басымдықтары мен кемшіліктерін айқындады. Теңіз суын тұщылау үшін атом энергиясын кең ауқымды пайдаланудың перспективасы зерттелген, оның ішінде ядролық тұщыландырудың көпжылдық тәжірибесі жинақталған Қазақстан Республикасының Маңғышлақ атом энергетика кешені мысалы келтірілген. Сонымен қатар, қазіргі әдістердің орнын басуы мүмкін прогрессивті технологияларға қысқаша шолу жасалған.

Түйін сөздер: дистилляция, иондық алмасу, кері осмос, электродиализ, ядролық тұщыту, первапорация.

**ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ
ОПРЕСНЕНИЯ
МОРСКОЙ ВОДЫ
И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИХ РАЗВИТИЯ**

В Послании Президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаева народу Казахстана «Стратегия 2050» были обозначены десять глобальных вызовов в XXI веке, одним из которых является острый дефицит воды. Вода является единственным средством, с помощью которого могут быть в совокупности решены основные глобальные проблемы (продовольственный, энергетический кризис, кризис здравоохранения и климатические изменения, экономический кризис). За последние 40 лет количество пресной воды на каждого человека в мире уменьшилось на 60%. Недостаток пресной воды к настоящему моменту испытывают более 80 стран мира, расположенных преимущественно в аридных, а также засушенных областях и составляющих около 60% всей поверхности земной суши. Треть населения мира живет в странах с напряженной ситуацией с водой. Согласно прогнозам экспертов, к 2025 году этот показатель увеличится до двух третей. В первую очередь, эта проблема затрагивает страны Ближнего и Среднего Востока, Средней и Центральной Азии, а также Северной Африки.

Ситуация с водообеспечением в Республике Казахстан является злободневной, имеется нехватка качественной питьевой воды и ощущается большая потребность в ней во многих регионах. Кроме того, около половины поверхностных вод Казахстана поступает с территории соседних государств, некоторые из которых также испытывают дефицит воды и увеличивают водозабор из года в год, что уменьшает объем поступающей воды в страну. Сейчас важной задачей, стоящей как перед зарубежными странами, так и перед Казахстаном, является опреснение морской воды, очистка, водоочистка, так как даже водопроводная вода из городского водоснабжения содержит повышенное содержание солей и различных загрязнений.

На сегодняшний день в мире представлен 14 451 опреснительный завод совокупной мощностью 59,9 млн куб. м в день. Кроме того, 244 опреснительные установки (дополнительно 9,1 млн куб. м в день) находятся в стадии строительства. Всего технологии опреснения морской воды применяются в 150 странах мира. Средний объем производства пресной воды составляет около 38 млн тонн в год. Рынок технологий опреснения соленой воды стремительно развивается. Около 62,4% общего объема

промышленного производства пресной воды составляют воды Мирового океана. Самые мощные опреснительные установки расположены в странах Ближнего Востока. В качестве примера крупнейшей системы опреснения можно привести Shoabia 3 (западное побережье Саудовской Аравии), выпускающий 880 000 м³ пресной воды в день. Также в регионе на стадии строительства находятся 7 установок мощностью более 400 000 м³ в день для каждой. Вместе с тем тенденцией последних лет стало расширение географических рамок рынка опреснения морской воды. Ближний Восток по-прежнему является крупнейшим потребителем пресной воды из Мирового океана (S. Porada, 2011: 19). Однако масштабные программы государственной поддержки отрасли стимулировали спрос на технологии в таких регионах, как Австралия, Алжир и Испания.

Промышленное опреснение морской воды осуществляется одним из следующих методов: дистилляция, обратный осмос, электродиализ, вымораживание и ионный обмен. Из всего объема получаемой в мире опресненной воды 96% приходится на долю дистилляционных опреснительных установок, 2,9% – электродиализных, 1% – обратноосмотических и 0,1% – на долю замораживающих и ионообменных опреснительных установок. Рассмотрим более подробно особенности каждой из технологий.

Широко применяются технологии многоступенчатого мгновенного выпаривания (дистилляции). Принципиальная схема любой дистилляционной опреснительной установки проста и включает два теплообменника – испаритель и конденсатор – с обслуживающими их трубопроводами и арматурой. Тем не менее, в настоящее время существуют различные дистилляционные опреснители, которые по основному признаку – способу испарения – делятся на две категории. Последнее может происходить либо при постоянном давлении, либо при понижении давления перегретой жидкости. В соответствии с этим различают испарители с постоянным давлением (кипящие) и расширительные (некипящие) (Алиев А.М., 2008: 551).

Более перспективной разновидностью дистилляционной технологии считается так называемое мгновенное (адиабатное) вскипание. Этот процесс, так же как и предыдущий, основан на зависимости давления водяных паров, насыщающих пространство над водой, от ее температуры. Для более полного использования тепловой энергии в опреснителе количество камер (ступеней) испарения долж-

но быть порядка 30-40. Технологическая схема многоступенчатого адиабатного опреснителя предусматривает предварительный нагрев исходной соленой воды (рис. 1). Это происходит в головном подогревателе. Нагретая вода подается в первую теплоиспользующую камеру. Здесь поддерживается давление, соответствующее температуре насыщения паров, меньшее, чем дает на выходе подогреватель. Из-за этого вода оказывается как бы сильно перегретой. По указанной причине происходит ее мгновенное вскипание. В опреснителях данного типа потоки холодной и подогретой соленой воды движутся как бы навстречу друг другу. Холодная вода течет по трубам в верхней части опреснителя. На их поверхности и происходит конденсация водяных паров. Образующийся при этом дистиллят стекает в специальные поддоны-сборники, откуда насосом откачивается потребителям. Рассматриваемая технология может иметь практически неограниченную производительность, что позволяет осуществлять строительство крупных опреснителей морской воды.

В промышленности применяется также метод парокомпрессионной дистилляции. Он отличается от прямого выпаривания тем, что полученный водяной пар сжимается при помощи компрессора, который поднимает давление и, следовательно, температуру пара таким образом, чтобы она на несколько градусов превышала температуру исходной соленой воды, предварительно подогретой в теплообменник. В этом случае пар конденсируется и превращается в опресненную воду, а его тепло идет на испарение новой порции соленой воды (Кучеров А. В., 2014: 238). Процесс парокомпрессионной дистилляции циклический. При непрерывной работе опреснителя энергия в нем расходуется только на подогрев соленой воды, так как теплота испарения практически полностью компенсируется энергией, выделяемой при конденсации пара. Именно это и определяет высокую эффективность данного одноступенчатого процесса.

Основным преимуществом многоступенчатых дистилляционных опреснительных установок является то, что на единицу первичного пара можно получить значительно большее количество обессоленной воды. Так при одноступенчатом испарении на 1 т первичного пара получают около 0.9 т опресненной воды, а на установках, имеющих 50-60 ступеней, – 15-20 т опресненной воды. Удельный расход электроэнергии в дистилляционных установках составляет 3,5-4,5 кВт час/м³ дистиллята. Эффек-

тивность работы дистилляционных испарителей ограничена образованием накипи в системе циркуляции горячего рассола. Поэтому в последние

годы предложены другие способы опреснения морской воды, которые не связаны с необходимостью ее испарения и конденсации.

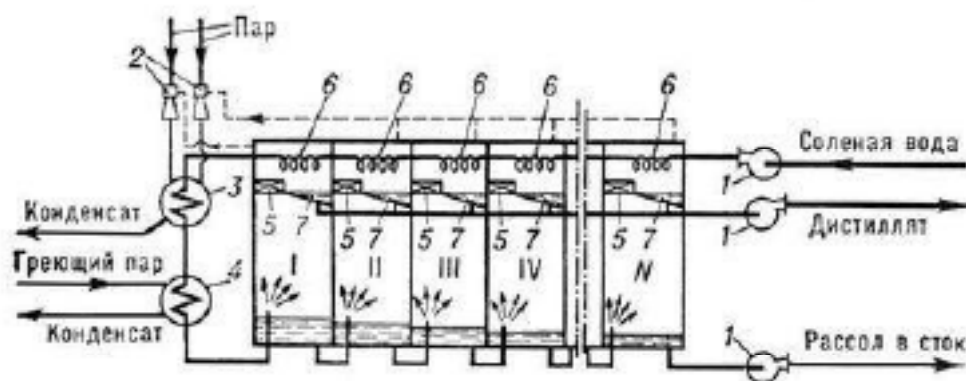


Рисунок 1 – Схема многоступенчатого дистилляционного опреснителя с мгновенным вскипанием: I, II, III, IV и N – камеры испарения; 1 – насос; 2 – паровой эжектор; 3 – конденсатор эжектора; 4 – подогреватель; 5 – брызгоулавливатель; 6 – конденсатор; 7 – поддон для сбора конденсата

В мембранной технологии преобладает метод опреснения воды, называемый «обратный осмос» (рис. 2). При опреснении воды этим методом морскую воду пропускают через полупроницаемые мембраны под воздействием давления, существенно превышающего разницу давлений пресной и морской воды (для морской воды 25–50 атм.). Через микропоры этих мембран могут свободно проникать небольшие молекулы воды, в то время как более крупные ионы соли

и другие примеси задерживаются мембраной. Такие мембраны изготавливаются преимущественно из полиамида или ацетата целлюлозы и выпускаются в виде полых волокон или рулонов (Мосин О.В., 2012а: 25). Обратный осмос обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими методами опреснения воды: относительно невысокие энергозатраты, установки конструктивно просты и компактны, работа их может быть легко автоматизирована.

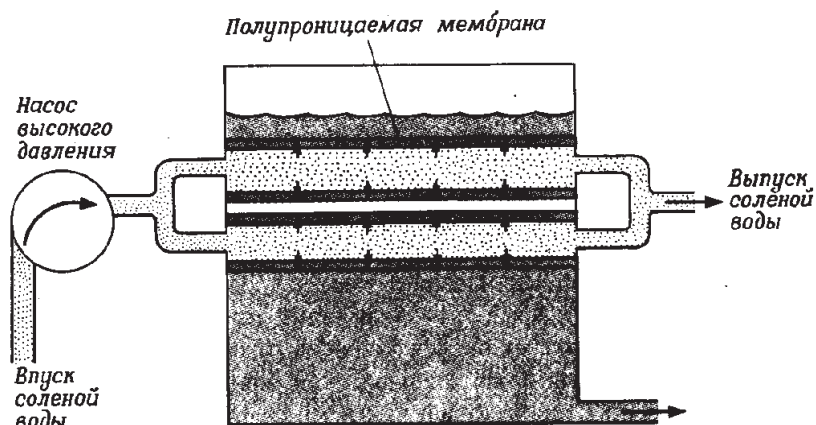


Рисунок 2 – Схема процесса опреснения воды методом обратного осмоса

Тем не менее, данная технология не лишена недостатков. Например, имеется зависимость от эффективности предварительной обработки воды, питьевая вода получается с достаточно высоким содержанием соли – около 500 мг/м общего солесодержания, а также имеются повышенные эксплуатационные расходы из-за потребления сопутствующих химикатов и необходимости замены мембранных фильтров

(Каграманов Г.Г., 2009: 65). Однако именно этот метод позволяет получать самый большой объем опресненной воды за единицу времени.

При электрохимическом опреснении (электродиализе) применяют специальные электрохимические активные диафрагмы, состоящие из пластмассы, резины с наполнителем и анионитовых или катионитовых смол (рис. 3).

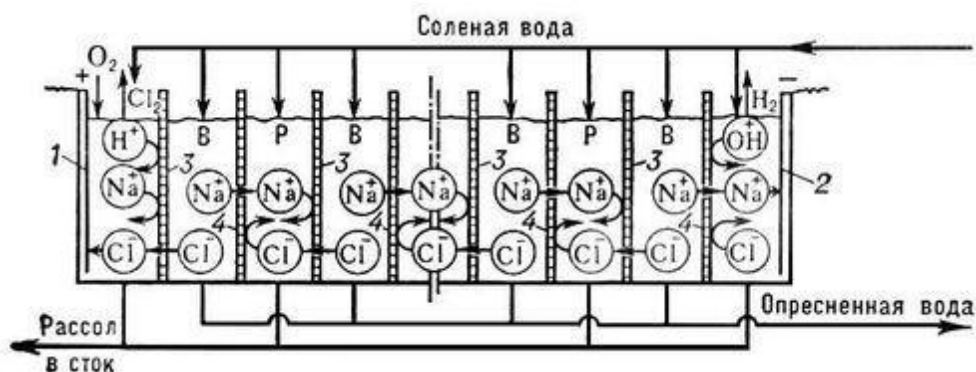


Рисунок 3 – Схема многокамерного электродиализного опреснителя: 1 – анод; 2 – катод; 3 – анионитовая мембрана; 4 – катионитовая мембрана; В – опресняемая вода; Р – рассол

Ванна с рассолом ограничена двумя диафрагмами: положительной и отрицательной. Под действием постоянного тока напряжением 110 – 120 В ионы солей, растворенных в воде, устремляются к электродам. Положительные катионы через катионпроницаемые диафрагмы, а анионы через анионитовую диафрагму проходят в крайние камеры, где встречаются с двумя пластинами: анодом и катодом. Встречаясь с одноименно заряженными диафрагмами, они остаются в этих камерах. В результате в промежуточных камерах оказывается обессоленная вода, которая стекает в отдельный сборник. Соли и рассолы из крайних камер отводятся за борт, а образующиеся газы (хлор и кислород) – в атмосферу (Мосин О.В., 2012б: 29).

Камеры, в которых опресняется вода, отделены от рассольных камер полупроницаемыми ионитовыми мембранами. При достаточном количестве пар мембран между анодом и катодом расход электроэнергии зависит от солености морской и опресненной воды: чем меньше разница между ними, тем процесс протекает экономичнее. Поэтому электродиализ целесообразно применять для опреснения слабосоленых вод при допустимом высоком солесодержании опресненной воды (500 – 1000 мг/л). Преимуществом

электродиализа по сравнению с обратным осмосом является то, что в этом процессе используются термически и химически более стойкие мембраны, что позволяет проводить процесс опреснения воды при повышенных температурах.

Опреснение методом вымораживания основано на том, что в естественных природных условиях лед, образующийся в океанах и морях, является пресным. При искусственном медленном замораживании соленой морской воды вокруг ядер кристаллизации образуется пресный лед игольчатой структуры с вертикальным расположением игл льда. При этом в межигльчатых каналах концентрация раствора, а следовательно, и его плотность, повышаются, и он, как более тяжелый, по мере вымораживания оседает вниз. При растаивании игольчатого льда образуется пресная вода с содержанием солей 500 – 1000 мг/л Cl (Пьеро Д. Лессьер, 2007: 27). При быстром замораживании рассол оказывается включенным в толщу льда, и сильное и интенсивное охлаждение приводит к замерзанию всей массы соленого раствора в единое ледяное тело. Для лучшего опреснения морского льда иногда применяется искусственное плавление его части при температуре ~20°C.

Вода, образующаяся при таянии, способствует более полному вымыванию солей из льда. Способ вымораживания достаточно прост и экономичен, но требует сложного и громоздкого оборудования.

Метод ионного обмена основан на свойстве твёрдых полимерных смол разной степени сшивки, ковалентно связанных с ионогенными группами (иониты), обратимо обмениваться ионами растворённых в воде солей (противоионы). В зависимости от заряда иониты подразделяются на положительно заряженные катиониты (H^+) и отрицательно заряженные аниониты (OH^-). В катионитах – веществах, аналогичным кислотам, анионы представлены в виде нерастворимых в воде полимеров, а катионы (Na^+) подвижны и обмениваются с катионами растворов. В противоположность катионитам, аниониты – по химической структуре основания, нерастворимую структуру которых образуют катионы. Их анионы (обычно гидроксильная группа OH^-) способны обмениваться с анионами растворов.

Процесс ионнообменного опреснения воды заключается в последовательном прохождении воды через неподвижный слой ионита в периодическом процессе или противоточным движением воды и ионита в непрерывном процессе (рис. 4). В этом процессе катионы и анионы солей обрабатываемой воды последовательно связываются с ионитами, в результате происходит её обессоливание. Соотношение ионита, анионита и катионита обычно составляет от 1:1 до 1.5:1.0 по массе.

В зависимости от заданной степени обессоливания воды проектируют одно-, двух- и трехступенчатые ионнообменные установки. Остаточное солесодержание при одноступенчатом ионнообменном опреснении составляет 20 мг/л. Для получения воды с солесодержанием до 0,5 мг/л применяют установки с двухступенчатой схемой H^+ - и OH^- -ионирования (Мосин О.В., 2011: 30). Ионнообменный способ опреснения воды имеет ряд достоинств: простота оборудования, малый расход исходной воды на собственные нужды (15-20% производительности установки), малый расход электроэнергии, малый объёмных сбросных вод.

Недостаток ионнообменного метода – сравнительно высокий расход реагентов, технологическая сложность процесса, который лимитируется исходным уровнем солесодержания обрабатываемой воды, определяющегося экономическими затратами. Рентабельность ионного

обмена при опреснении воды обычно ограничивается исходным содержанием растворённых солей 1.5-2.5 г/л.

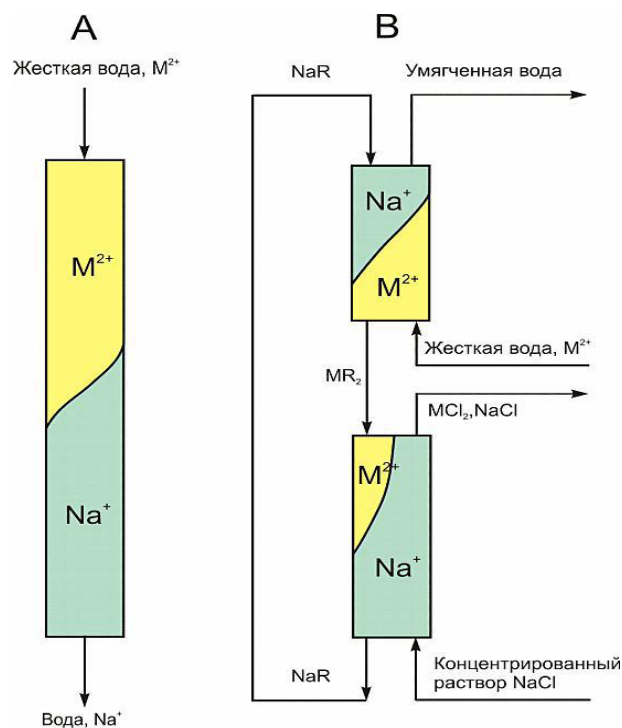


Рисунок 4 – Схемы ионнообменного опреснения воды ($M^{2+} = Ca^{2+}, Mg^{2+}$) на неподвижном слое ионита (а) и в противотоке (б) с движущимися слоями ионита (NaR, MR_2) и потоками воды

Таким образом, каждая из обозначенных технологий имеет существенные недостатки, к числу которых относятся: значительные отложения на поверхностях теплообмена, мембран и т. п.; большие удельные энергетические затраты; наличие большого количества сменных материалов, комплектующих; дополнительного расхода химических реагентов; экологическая опасность в процессе эксплуатации установок; необходимость в высокой квалификации обслуживающего персонала. В связи с этим актуальным остается вопрос разработки более эффективных и экологически безопасных методов опреснения морской воды.

Среди перспективных разработок следует выделить опреснительную установку, которая работает за счет энергии солнца. Данные проекты разрабатываются и реализуются учеными и инженерами в России, Индии, США, Саудовской Аравии, а также компанией Hitachi. Эти установки уступают по производительности

опреснения воды традиционным технологиям, но обладают высокой энергоэффективностью. Основное направление использования солнечных опреснителей – индивидуальное и мелкопромышленное использование. Так, российская индивидуальная солнечная опреснительная установка, состоящая из 10 секций, производит в день 120-180 л пресной воды, которая может использоваться, преимущественно, на сельскохозяйственное потребление. Пар проходит через серию мембран, которые отфильтровывают соль и другие загрязнения. Очищенная вода собирается на внешнем конденсаторе. По оценкам, средние затраты на опреснительную установку из 10 секций с устройством для подачи воды составят 250–300 \$, что позволит ей быстро окупиться (Кирпичникова И.М., 2012: 23). Получаемая пресная вода идентична по составу дождевой, поэтому применение её в сельском хозяйстве будет способствовать улучшению почвы.

Научные исследования по разработке установок по опреснению морской воды с использованием энергии солнца и ветра ведутся в Университете Кадиса. Научный проект «ETAP-ER project» (Evaluation del Tratamiento del Aqua Potable mediante Energia Renovable y Nanofiltration), финансируемый правительством Андалузии предполагает осуществление процесса опреснения также за счет возобновляемых источников, в том числе ветра. Установка предназначена для подготовки, очистки и опреснения воды, поступающей в водопроводную сеть города Порт Реал. Очистка воды производится с помощью специальных наномембран при многократном прогоне воды через них. Электропитание оборудования установки осуществляется от двух горизонтально-осевых ветро-энергетических установок общей мощностью 6 кВт и солнечной батареи на монокристаллическом кремнии с пиковой мощностью 4,2 кВт. В качестве дублирующего источника используется водородная установка мощностью 0,8 кВт (Rich Smith, 2013: 266).

Актуальность на сегодняшний день имеет технология опреснения морской воды, которая не требует больших затрат энергии. Это новый материал молекулярной фильтрации растворов на основе мембраны Perforene, разработанной американской оборонной компанией Lockheed Martin. Perforene представляет собой мембрану из материала графен. Графен представляет собой вещество из чистого углерода. Атомы углерода расположены в виде правильной шестиуголь-

ной сотовой структуры. В ней есть отверстия размером один нанометр и менее. Эти отверстия настолько малы, что способны удерживать частицы, несущие электрический заряд, но в то же время достаточно велики для того, чтобы сквозь них проходили молекулы воды. Несмотря на толщину в один атом, Perforene является одновременно прочным и долговечным материалом, что делает его эффективным для опреснения морской воды в больших объемах (Кучеров А.В., 2014: 237).

Новаторским отличием разработки Lockheed Martin можно считать использование графена вместо традиционных синтетических фильтров. Новая мембрана из графена в 500 раз тоньше, чем фильтры, используемые в современных опреснительных заводах. Толщина является одним из основных факторов, который определяет, сколько энергии должно быть использовано, чтобы заставить морскую воду проходить через фильтр в технологии обратного осмоса. Инновация позволит избежать засорения фильтров и экономить электроэнергию, потому что системе требуется меньшее рабочее давление, а значит, нужно меньше энергозатрат. Текущие фильтры используют пластиковые полимеры, которые потребляют огромное количество энергии в процессе проталкивания воды через них из-за высокого давления напора (от 5,52 МПа до 6,89 МПа), создание которого требует высоких энергозатрат.

Ниже представлены основные преимущества мембран Perforene от существующих на сегодняшний день: высокая устойчивость к большим значениям pH, агрессивным химикатам, углеводородам и другим химическим веществам в окружающей среде; возможность работы при высоких температурах; в два раза более проницаемые, чем существующие мембраны; большой потенциал для выдерживания высоких давлений; наличие хорошей гидрофобности, что снижает процессы загрязнения опреснительных установок (Кучеров А.В., 2014: 239). Но работа с таким тонким материалом представляет новые проблемы, и инженеры до сих пор пытаются найти лучший способ для создания нанометровых отверстий в мембране быстро и в больших масштабах без повреждения основного материала, что в итоге может сказаться на стоимости этой технологии.

Практически одновременно инженеры из Массачусетского технологического института (MIT) и Иллинойского университета в Урбане-Шампейне (UIUC) предложили новые способы

опреснения солёной воды. Метод MIT основан на ударных волнах, а UIUC использовали для отделения соли от воды пористый материал нанотолщины. Работа инженеров MIT с необычным методом опреснения была проведена под руководством профессора Мартина Базанта. При обычном электродиализе в сосуде для разделения делают перегородки из полупроницаемых мембран. В новом процессе, получившем название шоковый электродиализ, вода течёт через фритту – пористый керамический материал. С обеих сторон масса материала ограничена электродами. Достаточно сильный постоянный ток, протекающий между электродами, приводит к тому, что в потоке возникает ударная волна, чётко разделяющая поток на две части – в одной из которых течёт чрезвычайно солёная, а в другой – пресная вода. Остаётся только разделить потоки простой перегородкой. В этом процессе не используются мембраны, ничего не засоряется и не требует очистки, при этом обеспечивается постоянный поток воды через недорогой в производстве материал (Martin Z. Bazant, 2015: 78).

Инженеры из Иллинойса, тем не менее, предлагают свой вариант опреснения воды путём фильтрации её через мембрану. Однако их мембрана из дисульфида молибдена имеет толщину всего в несколько нанометров. Инженеры из UIUC утверждают, что их фильтр энергетически гораздо более выгоден, чем обычные фильтры для обратного осмоса, которые требуют больших энергетических затрат. Для опреснения воды через фильтры обычно требуется создавать большое давление, а мембраны быстро засоряются и требуют очистки или замены. Но по утверждению инженеров, давление, необходимое для опреснения воды, пропорционально толщине мембраны (Mohamed A. Darwish, 2016: 15). Многие учёные даже пытались использовать для фильтрации воды графен, но столкнулись со специфическими трудностями при взаимодействии его с водой.

Инженеры из UIUC взяли дисульфид молибдена, поскольку в нём молибден находится в окружении двух атомов серы. В результате у тонкого «листа» MoS_2 снаружи находится сера, а молибден – внутри. Если в таком листе сделать отверстие, вокруг него будет кольцо из атомов молибдена. Преимущества фильтра из MoS_2 в том, что молибден притягивает воду, а сера – отталкивает, что обеспечивает высокую скорость прохождения воды через отверстие. Это свойство химически заложено в MoS_2 , по-

этому его не нужно специально подготавливать или каким-то образом дорабатывать, в отличие от графена, где такая подготовка является очень сложным процессом (Mohamed A. Darwish, 2016: 15).

Ученые Александрийского университета в Египте предоставили экономичную технологию метода опреснения морской воды, с помощью которого можно отфильтровать очень солёную воду за несколько минут. Этот метод не требует больших затрат электроэнергии. Технология основана на мембранах с порошком ацетата целлюлозы, полученного из местного сырья. После добавления некоторых компонентов порошок эффективно связывает частицы соли, которые проходят сквозь мембрану. Мембрану можно изготовить из доступных, недорогих ингредиентов в любой лаборатории. Это настоящая панацея для развивающихся стран. Во время фильтрации воду сначала процеживают через мембрану, чтобы удалить крупные частицы, а затем нагревают для испарения. Полученный пар конденсируется и на выходе потребитель получает чистую воду. Опреснитель морской воды, основанный на мембранной технологии в сочетании и испарением можно использовать в отдалённых районах так, как необходимо обеспечить установку только недорогими фильтрами и огнём (Lauren F. Greenlee, 2009: 2347).

Новая технология основана на первапорации – мембранном процессе разделения жидких смесей. Первый этап этого процесса включает в себя фильтрацию жидкости через керамическую или полимерную мембрану. На втором же происходит испарение и сбор конденсированной воды. Пervaпорация является более быстрым, чистым и энергоэффективным методом по сравнению с традиционными. Пervaпорация уже использовалась в промышленности на протяжении многих лет. Но мембрана, применяемая на первом этапе, была слишком дорогой и сложной в изготовлении. Прорывом в этой области стало изобретение нового типа мембран, притягивающих соль. В её составе находится пудра ацетата целлюлозы, необходимая для процесса диффузионного испарения. Ацетат целлюлозы добывают из древесины, и его можно дешево и легко получить в любой лаборатории.

Такая мембрана поможет быстро опреснить морскую воду с высокой концентрацией соли и очистить даже сильно загрязнённую жидкость. Различные загрязняющие вещества и кристаллы соли негативно воздействуют на окружающую среду, а с помощью подобных мембран можно

уменьшить их концентрацию в любой жидкости (Lauren F. Greenlee, 2009: 2348). Проект по опреснению морской воды находится на стадии продвижения. В ближайшем будущем мембраны могут стать перспективной альтернативой очистным сооружениям в развивающихся странах, где вода и электричество являются дефицитными ресурсами.

На сегодняшний день в мировой практике 10–15% опреснительных заводов строятся сразу в комплексе с тепловой или другой электростанцией. В этом есть экономический смысл: на этапе строительства экономятся средства на капитальных затратах и операционные затраты также меньше. Именно из-за высокой потребности в энергии установки по опреснению морской воды особенно часто проектируются и строятся вместе с электростанциями. Росатом предлагает своим партнерам проектирование и строительство опреснительного комплекса производительностью до 170 тыс. куб. м в сутки в интеграции с АЭС большой мощности. Комплекс может работать по гибридной технологии, то есть сочетать в себе термический и мембранный методы обессоливания (Риферт В.Г., 2002: 45). Гибридная технология обеспечивает повышенную надежность, возможность использования низкопотенциального пара и умеренные эксплуатационные затраты при высоком качестве конечного продукта.

Технологический процесс получения питьевой воды включает в себя несколько этапов. Сначала вода проходит предварительную очистку. Первым делом ее пропускают через фильтрационную сетку, задерживающую мусор и крупные частицы. Затем добавляют два соединения: гипохлорит натрия для дезинфекции и хлорид железа – для коагуляции. Он связывает песчинки и другие мелкие частицы, формируя тяжелые хлопья, которые затем оседают вниз. Таким образом, проходит первый этап очистки, но вода еще не стала кристально чистой. Теперь она поступает на вторую стадию механической очистки – в песочных фильтрах. В каждом из них регулируются давление и поток, а потоки воздуха приводят песчинки в круговое движение. Вода поступает в нижнюю часть фильтра и движется вверх, а песчинки опускаются вниз против тока воды и захватывают с собой частицы взвеси. Теперь морская вода безусловно чистая и готова к опреснению.

Интегрированный комплекс позволяет проводить опреснение как мембранным, так и тер-

мическим способом. В первом случае оно проходит при помощи мембран – цилиндрических элементов, содержащих слои пластиковых листов с порами диаметром в тысячу раз меньше человеческого волоса. Они способны задержать микроскопические кристаллы соли. Очищаемая морская вода под большим давлением прогоняется через каскад цилиндрических труб, в каждой из которых установлены такие мембраны. Когда вода проходит через все мембраны и поступает в центр трубы, она полностью очищается от соли. Комплекс содержит несколько тысяч мембран.

В случае использования термического или дистилляционного метода (Multi-effect Distillation, или MED) очищенная вода при пониженном давлении окружающей среды мгновенно нагревается в специальных колоннах, многократно испаряется, затем пар конденсируется в виде пресной воды. Многоколонная дистилляция подразумевает, что морская вода нагревается в первой колонне, а образовавшийся пар идет на нагрев в последующих колоннах. Процесс проходит несколько стадий (Риферт В.Г., 2002: 46).

Преимущества интеграции опреснительного комплекса и АЭС состоят прежде всего в возможности оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат; совместного использования инфраструктуры. Это дает также возможность получения пресной воды для обеспечения собственных нужд АЭС (независимость и безопасность работы АЭС). Один энергоблок производит до 170 тыс. куб. м в сутки обессоленной воды. Имеет преимущество и модульность сооружения. Кроме того, решение не требует значительных изменений в проекте АЭС.

Однако, при всем многообразии проектов и попыток освоить ядерное опреснение пока никто не превзошел показатели, достигнутые в Казахстане. Имеется в виду завод в городе Актау, который начал работать в 1967 году и полностью обеспечивал пресной водой промышленные объекты города, а также население. Мангышлакский атомный энергетический комплекс, расположенный на полуострове Каспийского моря, в 12 км от города Актау, состоял из реактора БН-350 на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, тепловой блочной электростанции, двух газовых ТЭЦ, 10 многоступенчатых дистилляционных опреснительных установок, станции приготовления питьевой воды, цеха химической водоочистки. Этот комплекс поставлял 135 МВт электри-

ческой мощности и производил в среднем 80 тыс. м³/д питьевой воды на протяжении 25 лет (Муралев Е.Д., 2015: 47).

Комплекс, построенный в советское время, проработал 35–40 лет, то есть переработал свой срок. Следует отметить, что после выведения из эксплуатации атомного энергоблока в 1999 году опреснительный завод стал работать на энергии от ТЭЦ, которые были еще раньше построены как резервные мощности. В середине нулевых годов Мангистауский атомный энергокомбинат АО НАК «Казатомпром» начал постепенно менять оборудование этого завода. В 2007–2008 было проведено два тендера, в одном выиграла израильская компания IDE Technologies, в другом – французская SIDEM. На сегодняшний день введена в эксплуатацию термическая дистилляционная установка на 12 тыс. м³/д израильского производства; в стадии пусконаладки находятся две французские установки общей производительностью 24 тыс. м³/д (Муралев Е.Д., 2015: 48).

Следует отметить, что одним их преимуществ реактора БН-350 Мангышлакского атомного энергетического комплекса являлось минимальное радиологическое воздействие на окружающую среду. Средняя эмиссия радиоактивных газов, включая аргон, ксенон и криптон, составляла 0–15 Ки/сут (что в десятки раз ниже допустимого уровня 500 Ки/сут). Эти газообразные выбросы имеют короткий период полураспада и не вредны для населения. Эксплуатационный опыт и анализ проектных и запроектных аварий показали, что радиологические последствия при нормальных эксплуатационных режимах и отклонениях от них не влияли на качество производимой воды и пара.

Казахстанские ядерщики предложили новый способ опреснения воды. Работы по созданию собственной опреснительной конструкции были начаты еще в 1990-х годах, затем в связи с тяжелой экономической ситуацией в Республике Казахстан остановлены и возобновлены только в 2015 году. Опытно-конструкторские работы финансируются НАК «Казатомпром». Ученые утверждают, что их способ позволит уменьшить затраты на опреснение воды. Установка имеет серьезное преимущество перед зарубежными аналогами. Например, Израиль обеспечивают водой огромные опреснительные заводы производительностью от 100 тысяч кубометров воды в день. Отечественная установка позволяет получить сопоставимую себестоимость

литра воды при мощности от 100 кубометров в день (Муралев Е.Д., 2015: 49). Новую установку можно использовать для обеспечения водой удаленных поселков и малых городов. Конструкция отличается очень эффективным использованием тепла, а испаряемая соленая вода не контактирует с твердыми поверхностями, что позволяет избежать регулярной очистки стенок от соли. Технология опреснения воды защищена патентом, построен и испытан опытный образец. Успешное внедрение данной разработки даст мощный толчок развитию атомного опреснения и позволит Казахстану участвовать в международном сотрудничестве уже не только как стране, эксплуатирующей современный атомно-энергетический комплекс, но и как разработчику и поставщику технологий, которые могут быть реализованы не только на побережье Каспийского моря, но и в других регионах мира, страдающих от нехватки пресной воды.

В дополнение к опыту Японии и Казахстана в нескольких странах предполагается демонстрация новых установок атомного опреснения. Например, Республика Корея добилась определенных успехов в проектировании теплоэнергетической атомной опреснительной установки на основе реактора SMART мощностью 330 МВт (тепл.). Китай планирует увеличить к 2020 году долю атомной энергетики до 40 ГВт. В настоящее время в Китае находится в эксплуатации 11 блоков реакторов мощностью более 9,1 ГВт и в различных стадиях строительства еще 22 блока общей мощностью 22,1 ГВт. Большая часть проектов имеет в своем составе опреснительные установки. Так на АЭС Liaoning Hongyanhe строится первая очередь опреснительных установок производительностью 17000 т/сут с дальнейшим расширением до 100000 т/сут (S. Porada, 2013: 1390).

На основании вышесказанного, можно сделать вывод, что опреснение морской воды на сегодняшний день – одна из самых серьезных задач, решение которой позволит избежать многих проблем в будущем. Ввиду глобального и постоянного сокращения запасов пресной воды в мире, задача опреснения морской воды, очистки, водоочистки становится если не самой важной, то, во всяком случае, одной из самых значительных. Выбор метода и технологии опреснения воды зависит от предъявляемых к воде требований по качеству и солесодержанию, а также технико-экономических показателей. В зависимости от реализуемого способа опресне-

ния воды применяются различные типы опреснительных установок. Тренды нехватки воды уже сейчас приводят к разработке новых технологических решений (например, использование новых фильтрующих материалов, таких как графен, мембрана из дисульфида молибдена и т.д.). Будущий прогнозируемый рост нехватки пресной воды приведет к дальнейшему росту рынка опреснительного оборудования. Международная организация МАГАТЭ про-

гнозирует ускорение темпов сооружения АЭС в мире и активно развивает идеи опреснения на базе АЭС, в том числе с использованием опыта работы Мангышлакского атомного энергетического комплекса Республики Казахстан. Применяемые в технике опреснения соленых вод инновационные методы могут быть эффективно использованы для возвращения природе использованной воды, не ухудшающей состояния пресных водоемов.

Литература

- 1 Алиев А.М., Юсифов Р.Ю., Кулиев А.Р., Юсифов Ю.Г. Применение методики гидратообразования для оценки обессоливания воды // Прикладная химия. – 2008. – № 51 (4). – С. 550-554.
- 2 Degremont. Технический справочник по обработке воды: В 2 т.: пер с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 920 с.
- 3 Каграманов Г.Г. Диффузионные мембранные процессы: учебное пособие. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. – 73 с.
- 4 Кирпичникова И.М. Опреснение воды с использованием энергий ветра и солнца // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 16. – С. 22–25.
- 5 Кучеров А.В., Шибилева О.В. Опреснение воды: современное состояние и перспективы развития // Молодой ученый. – 2014. – №3. – С. 236-239.
- 6 Мосин О.В. Физико-химические основы опреснения морской воды // Сознание и физическая реальность. – 2012. – № 1. – С. 19-30.
- 7 Мосин О.В. Магнитные системы обработки воды. Основные перспективы и направления // Сантехника. – 2011. – №1. – С. 26-34.
- 8 Мосин О. В. Установки опреснения морской воды // Журнал СОК. – 2012. – №1.– С. 28-31.
- 9 Муралев Е.Д. Опыт и перспективы развития атомного опреснения в Казахстане // «МАЭК-Казатомпром». – 2015. – №2. – С. 46-53.
- 10 Орлов Н.С. Промышленное применение мембранных процессов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. – 226 с.
- 11 Пантелеев А.А., Рябчинов Б.Е. Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранной технологий // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 30-36.
- 12 Пьеро Д. Лессьер. Процессы опреснения: наилучшее технико-экономическое решение // Сантехника. – 2007. – №1. – С. 26-32.
- 13 Риферт В.Г., Антонович А.В., Костюк Г.В., Лизунов В.В. Использование новых технологий водоподготовки для приготовления воды на ТЭС и АЭС // Энергетика. – 2002. – №12. – С. 41-46.
- 14 Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии: учебное пособие. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2006. – 170 с.
- 15 Танганов Б.Б. Морская вода и проблема ее опреснения // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 7. – С. 90-92.
- 16 Cohen M., Ianovici I., Breschib D. (2002) Power plant residual heat for seawater desalination. Desalination, vol. 152., pp. 155–165.
- 17 David T. Schoen, Alia P. Schoen, Liangbing Hu, Han Sun Kim, Sarah C. Heilshorn, Yi Cui (2010) High Speed Water Sterilization Using One-Dimensional Nanostructures. Nano Letters, vol. 10 (9), pp. 3628–3632.
- 18 Kimm Y, Logan B.E. (2011) Electrodialysis Cells for Partial or Complete Seawater Desalination. Environmental Science and Technology, vol. 12, pp. 586–596.
- 19 Kim S.J., S.H. Ko, K.H. Kang, J. Han (2010) Direct seawater desalination by ion concentration Polarization. Nat. Nanotechnol, vol.5, pp. 297-235.
- 20 Konishi T., B.M.Misra (2011) Fresh water from the Seas. Nuclear desalinations projects are moving ahead. IAEA Bulletin, vol. 43, pp. 12-20.
- 21 Lauren F. Greenlee, Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin (2009) Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water Research, vol. 43, pp. 2317–2348.
- 22 Mahmoud M Elewa, Ahmed El-Shafei, Abeer Moneer, Mona M. Naim (2015) Desalination of simulated seawater by purge-air pervaporation using an innovated fabricated membrane. Water Science & Technology, vol.1, no.1, pp. 58–65.

- 23 Menachem Elimelech, William A. Phillip (2011) The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment. *Science*, vol. 333, pp. 712-717.
- 24 Mohamed A. Darwish, Hassan K. Abdulrahim, Ashraf S. Hassan, Basem Shomar (2016) Reverse osmosis desalination system and algal blooms Part I: harmful algal blooms (HABs) species and toxicity. *Desalination and Water Treatment*, vol. 2, pp. 1-22.
- 25 Martin Z. Bazant, Wassim Aouad, William A. Braff, Sven Schlumpberger, Matthew E. Suss, Daosheng Deng (2015) Water purification by shock electro dialysis: Deionization, filtration, separation, and disinfection. *Desalination*, vol. 357, pp. 77-83.
- 26 Rich Smith (2013) Lockheed Moves Into Water Desalination Industry. *Industrials*, vol. 77, pp. 265-270.
- 27 Ronan K. McGovern, Adam M. Weiner, Lige Sun, Chester G. Chambers, Syed M. Zubair, John H., Lienhard V. (2014) On the cost of electro dialysis for the desalination of high salinity feeds. *Applied Energy*, vol. 136, pp. 649-661.
- 28 Ronan K. McGovern, Syed M. Zubair, John H. Lienhard V. (2014) The benefits of hybridising electro dialysis with reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, vol. 469, pp. 326-335.
- 29 Porada S., R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser, P.M. Biesheuvel (2013) Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Progress in Materials Science*, vol. 58, pp. 1388-1442.
- 30 Withers (2005) Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants. *Desalination*, vol. 179, pp. 11-24.

References

- 1 Aliev A. M., Jusifov R. Ju., Kuliev A. R., Jusifov Ju. G. (2008) Primenenie metodiki gidratoobrazovaniya dlja ocenki obessolivaniya vody [The application of the methods for assessment of demineralization of water condensation]. *Prikladnaja himija*, no.51 (4), pp. 550-554.
- 2 Degremont. *Tehnicheskij spravochnik po obrabotke vody* [Technical reference for water treatment]. v 2 t., per s fr. – SPb.: Novyj zhurnal, 2007. - 920 P.
- 3 Kagramanov G.G. *Diffuzionnye membrannye processy: uchebnoe posobie* [Diffusion membrane processes: a tutorial]. – M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 2009. – 73 P.
- 4 Kirpichnikova I. M. (2012) Opresnenie vody s ispol'zovaniem jenergij vetra i solnca [Water desalination using wind energy and solar]. *Vestnik juzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika*, no.16, pp. 22-25.
- 5 Kucherov A. V., Shibileva O. V. (2014) Opresnenie vody: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya [Water desalination: current status and prospects of development]. *Molodoj uchenyj*, no. 3, pp. 236-239.
- 6 Mosin O.V. (2012) Fiziko-himicheskie osnovy opresnenija morskoy vody [Physico-chemical fundamentals of sea water desalination]. *Soznanie i fizicheskaja real'nost'*, no. 1, pp. 19-30.
- 7 Mosin O.V. (2011) Magnitnye sistemy obrabotki vody. Osnovnye perspektivy i napravlenija [The magnetic system of water treatment. The main prospects and directions]. *Santehnika*, no.1, pp. 26-34.
- 8 Mosin O. V. (2012) Ustanovki opresnenija morskoy vody [Desalination of sea water]. *SOK*, no.1, pp. 28-31.
- 9 Muralev E.D. (2015) Opyt i perspektivy razvitiya a tomnogo opresnenija v Kazahstane [Experience and prospects of development of desalination and languid in Kazakhstan]. *MAJeK-Kazatomprom*, no. 2, pp. 46-53.
- 10 Orlov N.S. (2007) Promyshlennoe primenenie membrannyh processov [Industrial application of membrane processes]. – M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, – 226 P.
- 11 Pantelev A.A., Rjabchinov B.E. (2012) Proektnye reshenija vodopodgotovitel'nyh ustanovok na osnove membrannoj tehnologii [Project solutions water treatment based on membrane technology]. *Teplojenergetika*, no. 7, pp. 30-36.
- 12 P'ero D. Less'er. (2007) Processy opresnenija: nailuchshee tehniko-jekonomicheskoe reshenie [The process of desalination: the best technical-economic solution]. *Santehnika*, no. 1, pp. 26-32.
- 13 Rifert V.G., Antonovich A.V., Kostjuk G.V., Lizunov V.V. (2002) Ispol'zovanie novyh tehnologii vodopodgotovki dlja prigotovlenija vody na TES i AJeS [The use of new technologies of water treatment to prepare water for TES and nuclear power plants]. *Jenergetika*, no.12, pp. 41-46.
- 14 Svitcov A.A. *Vvedenie v membrannye tehnologii* [Introduction to membrane technology]. – Uchebnoe posobie. – RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2006. – 170 P.
- 15 Tanganov B.B. (2010) Morskaja voda i problema ee opresnenija [Seawater and a desalination]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, no. 7, pp. 90-92.
- 16 Cohen M., Ianovici I., Breschib D. (2002) Power plant residual heat for seawater desalination. *Desalination*, vol. 152., pp. 155-165.
- 17 David T. Schoen, Alia P. Schoen, Liangbing Hu, Han Sun Kim, Sarah C. Heilshorn, Yi Cui (2010) High Speed Water Sterilization Using One-Dimensional Nanostructures. *Nano Letters*, vol. 10 (9), pp. 3628-3632.
- 18 Kimm Y, Logan B.E. (2011) Electro dialysis Cells for Partial or Complete Seawater Desalination. *Environmental Science and Technology*, vol. 12, pp. 586-596.
- 19 Kim S.J., S.H. Ko, K.H. Kang, J. Han (2010) Direct seawater desalination by ion concentration Polarization. *Nat. Nanotechnol*, vol.5, pp. 297-235.

- 20 Konishi T., B.M.Misra (2011) Fresh water from the Seas. Nuclear desalinations projects are moving ahead. IAEA Bulletin, vol. 43, pp. 12-20.
- 21 Lauren F. Greenlee, Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman , Benoit Marrot , Philippe Moulin (2009) Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water Research, vol. 43, pp. 2317–2348.
- 22 Mahmoud M Elewa, Ahmed El-Shafei , Abeer Moneer, Mona M. Naim (2015) Desalination of simulated seawater by purge-air pervaporation using an innovated fabricated membrane. Water Science & Technology, vol.1, no.1, pp. 58–65.
- 23 Menachem Elimelech, William A. Phillip (2011) The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment. Science, vol. 333, pp. 712-717.
- 24 Mohamed A. Darwish, Hassan K. Abdulrahim, Ashraf S. Hassan, Basem Shomar (2016) Reverse osmosis desalination system and algal blooms Part I: harmful algal blooms (HABs) species and toxicity. Desalination and Water Treatment , vol. 2, pp. 1-22.
- 25 Martin Z. Bazant, Wassim Aouad, William A. Braff, Sven Schlumpberger, Matthew E. Suss, Daosheng Deng (2015) Water purification by shock electro dialysis: Deionization, filtration, separation, and disinfection. Desalination, vol. 357, pp. 77–83.
- 26 Rich Smith (2013) Lockheed Moves Into Water Desalination Industry. Industrials, vol. 77, pp. 265–270.
- 27 Ronan K. McGovern, Adam M. Weiner, Lige Sun, Chester G. Chambers, Syed M. Zubair, John H., Lienhard V. (2014) On the cost of electro dialysis for the desalination of high salinity feeds. Applied Energy, vol. 136, pp. 649–661.
- 28 Ronan K. McGovern , Syed M. Zubair, John H. Lienhard V. (2014) The benefits of hybridising electro dialysis with reverse osmosis. Journal of Membrane Science, vol. 469, pp. 326–335.
- 29 S., R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser , P.M. Biesheuvel (2013) Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. Progress in Materials Science, vol. 58, pp. 1388–1442.
- 30 Withers (2005) Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants. Desalination, vol. 179, pp. 11-24.