

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ АТОМНЫЕ ЭНЕРГООПРЕСНИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С МОДУЛЬНЫМИ ЯДЕРНЫМИ РЕАКТОРАМИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, ПРИ СОЗДАНИИ КОТОРЫХ ЦЕЛЕСООБРАЗНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ОПЫТ СУДОВОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Соколова Е.А., Федорович Е.Д., Садеги Х, Газаи Х., Алакам К.А (ФГАОУ ВО «СПбПУ», Санкт-Петербург, Россия),
Макухин С.С. (ОАО «СПбАЭП, Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Атомное опреснение, под которым понимается использование энергии (электрической и тепловой), производимой ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) является общеприменимой и быстроразвивающейся в мире технологией, поскольку позволяет реальным образом ликвидировать угрозу нехватки пресной воды, характерной для многих стран мира. Использование атомного энергоисточника позволяет обеспечить крупнотоннажное производство опресненной морской воды, превышающее десятки тысяч кубометров в сутки. Предлагаемые на рынках атомного опреснения проекты многоцелевых атомных энергоопреснительных комплексов (МАК) весьма разнообразны – как по схемам, в энергетической и в опреснительной части, так и по составу оборудования. Однако, при рассмотрении этих процессов четко обнаруживаются тенденции преимущественного использования в них т.н. малых модульных реакторов (ММР, SMR – Small Modular Reactors) водо-водяного типа. Эта тенденция не случайна – реакторы этого типа (ВВЭР или PWR) давно освоены в серийном производстве и успешно (и безопасно) эксплуатируются на АЭС многих стран, а также на атомном подводном и атомном ледокольном флоте. ЯЭУ с реакторными установками корабельного типа по своим характеристикам как нельзя лучше соответствуют требованиям, предъявляемым к энергоисточнику опреснительного производства. Россия уже имеет первоначальный опыт использования ММР в целях одновременного производства электричества, теплоснабжения и опреснения. Речь идет о «Плавучей АЭС» «Академик Ломоносов», имеющей в своем составе два ММР ледокольного типа КЛТ-40С.

В настоящей статье кратко обсуждаются достоинства и недостатки проектов ММР, предлагаемых разработчиками различных стран, а также приводится ряд принципиальных схем МАК с реакторами ММР, использующими различные технологии опреснения: MED (multi-effect distillation) – многоколонную дистилляцию, MSF (multi-stage flash desalination) – мгновенное вскипание и гибридные технологии, в которых наряду с указанными технологиями используется технология обратного осмоса RO (Reversed Osmosis). Отечественная судовая ядерная энергетика имеет в составе своих достижений разработку интегральной ядерной паропроизводящей установки (ИЯППУ) с естественной циркуляцией ядерного теплоносителя ($E_{цт}$). Принцип интегральности позволяет избавиться от трубопроводов для реакторного теплоносителя, а принцип организации $E_{цт}$ позволяет избавиться от главных циркуляционных насосов. И то и другое очевидным образом повышает надежность установки, одновременно снижая ее стоимость.

В статье приводится схема установок ИЯППУ- $E_{цт}$, которые можно использовать как ядерный модуль в составе МАК, формулируются и выводы, вытекающие из ее содержания и рекомендации в части проектирования МАК с ИЯППУ- $E_{цт}$ и ее внедрения в опреснительное производство. Проект МАК с ИЯППУ- $E_{цт}$ может быть использован для эксплуатации МАК в России (известна, например, нехватка воды в Крыму), но главным

образом для экспортных поставок Россией в те страны, в которых нехватка воды весьма ощутима и растет с каждым годом.

1. Опреснение морской воды

Опреснение морской воды — это процесс удаления соли и других примесей из морской воды для получения пресной воды, подходящей для различных целей, таких как питье, орошение, промышленные процессы и т.д. Около 71 % земной поверхности окружено водой, но только 3 % составляют пресные воды, тогда как морская вода составляет 97 % [1]. Поскольку эти запасы пресной воды распределены неравномерно, многие части мира в настоящее время переживают или ожидают серьезного водного кризиса. В качестве ключевого метода для решения растущих глобальных проблем, связанных с нехваткой воды, опреснение морской воды предлагает «спасательный круг», превращая морскую воду в жизнеспособный источник пресной воды, особенно в регионах, борющихся с засушливым климатом и нехваткой воды.

В процессах опреснения соленой воды используется широкий спектр технологий, которые в свою очередь подразделяются на две основные группы. В термической группе тепловая энергия и электроэнергия используются для испарения морской воды, где после конденсации собирается пресная вода. В мембранных процессах используют движущие силы, такие как давление, электрический потенциал и концентрация, для преодоления естественного осмотического давления, чтобы эффективно заставить молекулы воды двигаться через мембрану. Любой из этих процессов опреснения может быть подходящим в зависимости от обстоятельств и других переменных, таких как качество исходной воды, желаемое количество и качество получаемой воды, предварительная обработка, количество располагаемой энергии, необходимые химикаты и утилизация рассола.

1.1. Термические процессы

Многоколонное мгновенное испарения (MSF) — это метод термического опреснения, который использует мгновенное испарение для преобразования морской воды в пресную. В MSF морская вода нагревается, а затем подвергается воздействию уменьшающегося давления в ряде ступеней или камер. Это снижение давления побуждает некоторое количество воды превращаться в пар, оставляя после себя более концентрированный рассол. Впоследствии пар конденсируется обратно в жидкую пресную воду посредством охлаждения. MSF работает в несколько стадий, каждая из которых имеет более низкое давление, чем предыдущая, что повышает эффективность производства пресной воды. MSF был самым популярным методом дистилляции с 1980-х по 2000-е годы благодаря приемлемому техническому и эксплуатационному качеству, а также долговечности [2]. Несмотря на то, что количество необходимой электрической энергии минимально по сравнению с тепловой, MSF нуждается как в тепловой, так и в электрической энергии. К двум наиболее значительным преимуществам технологии MSF можно отнести ее большую емкость и простоту конструкции.

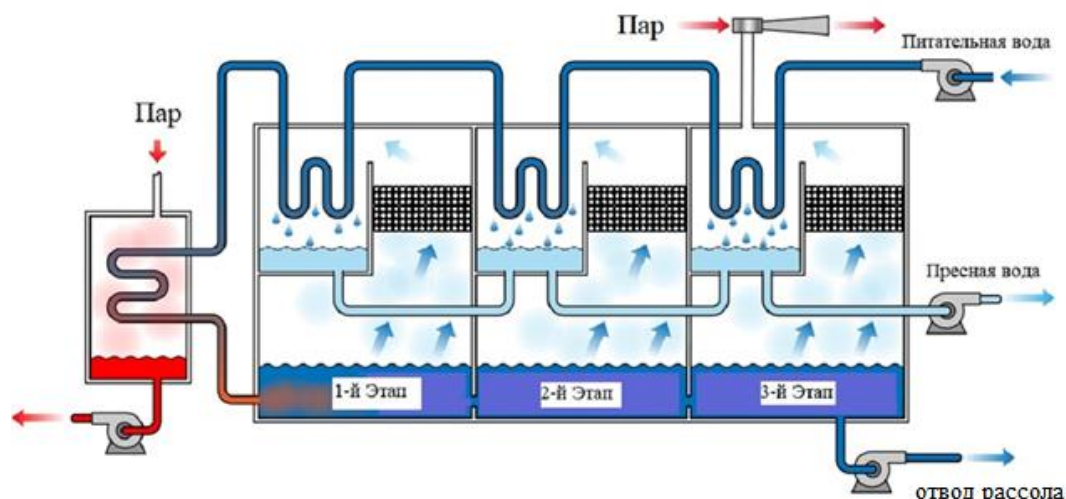


Рис. 1. Установка опреснения морской воды методом MSF [3]

Многоколонное испарение (MED) — это еще один метод термического опреснения, который отделяет пресную воду от морской посредством испарения и конденсации. В MED морская вода нагревается в последовательности взаимосвязанных камер, называемых «эффектами». Каждый эффект работает при все более низком давлении. Когда морская вода проходит через эти эффекты, она испаряется при все более низких температурах. Полученный пар затем снова превращается в пресную воду путем конденсации, чему способствует охлаждение. Тепло, выделяющееся при конденсации на одном этапе, используется для нагрева следующего эффекта, что повышает общую эффективность. В MED для предотвращения образования накипи температура начального (наиболее теплого) воздействия обычно поддерживается ниже 70 °C. Одним из преимуществ MED является низкая рабочая температура, что позволяет использовать менее дорогие и более прочные материалы, такие как алюминиевые сплавы, для теплообменных труб, а не трубы из медного сплава. В случае MED между эффектами может быть очень небольшая разница температур (1,5–2,5 °C), что позволяет добавить 10–16 эффектов с максимальной температурой рассола примерно 70 °C [4].

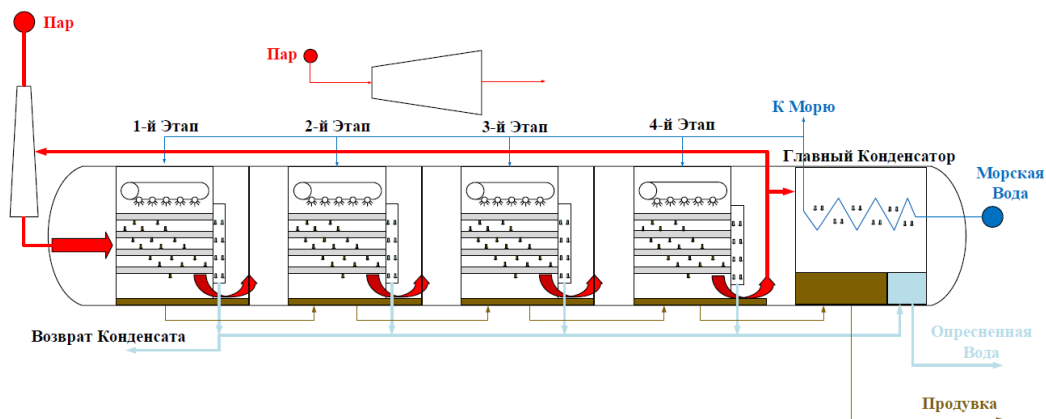


Рис. 2. Установка опреснения морской воды методом многоколонного испарения [3]

И MSF, и MED применяются в регионах с доступными источниками тепловой энергии, и их технологии позволяют удалять из сильносоленой воды до 70 000 мг/л соледержащих растворов, оставляя конечную концентрацию соледержания 5–25 мг/л [4].

1.2. Процесс обратного осмоса (Reverse Osmosis - RO)

Мембранное опреснение использует специальные мембраны, которые позволяют молекулам воды проходить сквозь них, препятствуя проникновению растворенных солей и загрязняющих веществ, эффективно производя пресную воду из таких источников, как морская и солоноватая вода. Основным мембранным методом опреснения является обратный осмос (RO). В системах обратного осмоса используется полупроницаемая мембрана с крошечными порами. Подвергая морскую или солоноватую воду повышенному давлению, превышающему ее естественное осмотическое давление, молекулы воды смещаются через мембрану с более концентрированной стороны (например, морской воды) на менее концентрированную (пресная вода). В результате получается «пермеатный» поток пресной воды, а «бракованный» поток, содержащий концентрированный рассол, остается и удаляется. Системы обратного осмоса превосходно удаляют множество загрязняющих веществ, включая соли, минералы, микроорганизмы и органические соединения.

Коммерческие методы обратного осмоса составляют 53 % рынка опреснения в целом, в то время как технологии термического опреснения составляют около 33 % рынка, а технология электродиализа (ED) и другие процессы составляют оставшиеся 20 % [5].

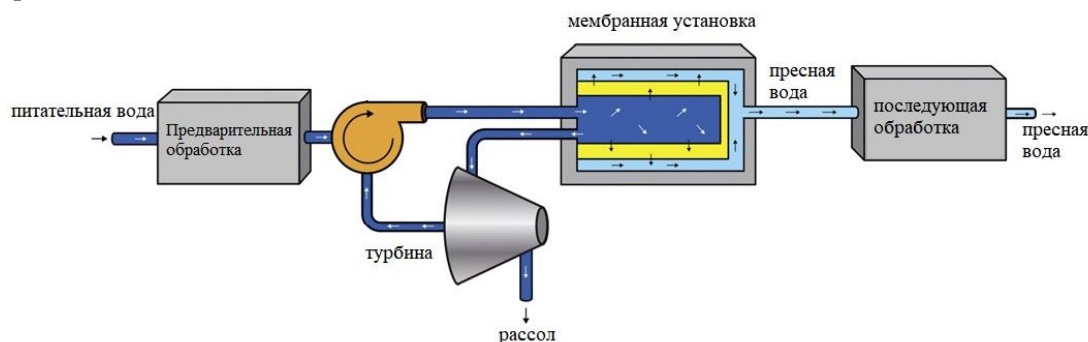


Рис. 3. Схема простой установки обратного осмоса [3]

2. Многоцелевые атомные энергоопреснительные комплексы

В стремлении удовлетворить растущие потребности в энергии и обеспечить источники чистой воды важным решением стало сочетание ядерной когенерации и опреснения морской воды. Ядерная когенерация предполагает выработку как электроэнергии, так и полезной тепловой энергии из одной системы ядерных реакторов. Атомные электростанции в основном производят электроэнергию, но когенерация использует избыточное тепло, образующееся при делении ядер. Это избыточное тепло можно использовать для различных целей, включая опреснение морской воды. Установки ядерной когенерации можно было бы использовать вокруг площадок атомных электростанций, а продукты с добавленной стоимостью, отличные от тепла и электричества, можно было бы производить с использованием тепла и электричества из ядерных реакторов. Эти действия также часто называют неэлектрическим или неэнергетическим использованием ядерной энергии. С наиболее распространенными водоохлаждаемыми реакторами, составляющими текущий мировой атомный парк, а также планируемыми модернизированными реакторными технологиями, операции атомного опреснения составляют важный класс технологических процессов, которые могут поддерживаться ядерным реактором [6].

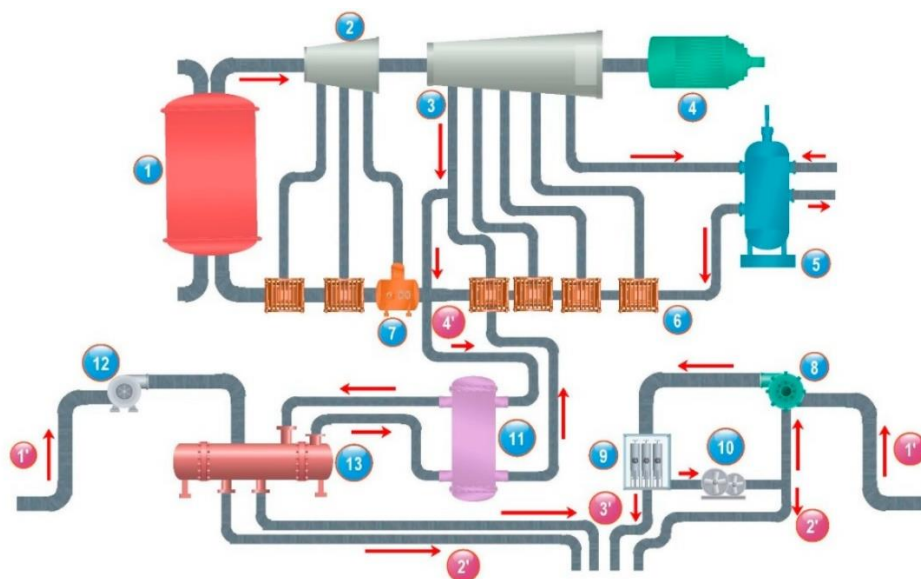


Рис. 4. Схема многофункционального атомного энергоопреснительного комплекса

Проекты атомного опреснения могут одновременно и устойчиво удовлетворять потребности электростанции в воде (охлаждающей, питательной и т.д.), а также для внешних потребителей в промышленном, сельскохозяйственном и жилом секторах. Опреснительные установки от атомного энергоисточника могут работать с коэффициентом использования мощности до 90 %. Они могут использовать уже доступную землю рядом с атомной электростанцией, получать выгоду от эффекта масштаба и использовать общие ресурсы, включая рабочую силу, трубопроводы для забора и отвода морской воды, а также процедуры предварительной обработки сырой воды.

Несмотря на привлечение внимания с 1950-х годов, существует только одна атомная когенерационная установка для опреснения морской воды, расположенная на полуострове Каспийского моря в 12 км от города Актау. Мангистауский атомно-энергетический комбинат выдавал 135 МВт электроэнергии от реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-350 и производил до 120 тыс. м³ в сутки питьевой воды в течение 27 лет [7].

В настоящее время несколько стран, таких как Россия, Япония, США, Индия и Пакистан изучают ядерную когенерацию для опреснения. В прошлом было продемонстрировано использование ядерных реакторов для опреснения соленой воды с использованием ядерного тепла и/или электроэнергии для целей опреснения. Недавно Пакистан и Индия успешно продемонстрировали атомное опреснение с использованием опреснительных систем, которые были модернизированы на их уже работающих ядерных энергетических реакторах [6].

Выбор системы опреснения зависит от таких факторов, как температура и количество доступного избыточного тепла, эффективность процесса опреснения, потребность региона в воде и нормативные требования. Такие системы, как MSF, MED и RO могут быть использованы в когенерационных установках. Важно провести тщательное технико-экономическое обоснование и инженерные оценки, чтобы определить наиболее подходящую систему опреснения для интеграции с атомной когенерационной установкой.

3. Малые модульные реакторы, основанные на использовании морской атомной электростанции для ядерного опреснения

Малые модульные реакторы (ММР) — это тип ядерных реакторов, которые имеют меньшие размеры и мощность по сравнению с традиционными крупномасштабными ядерными реакторами. Их часто классифицируют на основе их выходной мощности, при этом типичный диапазон не превышает 300 мегаватт тепловой или 100 мегаватт электрической мощности. ММР обладают рядом преимуществ, включая повышенную безопасность, повышенную гибкость, простоту развертывания и потенциальную экономию денежных средств. Важным преимуществом является возможность подключения ММР к другим энергопотребляющим системам, включая опреснительные установки, в целях создания когенерационной установки. Это позволяет странам изучить возможность размещения когенерационных объектов в различных местах и позволяет регионам с локальными электрическими сетями и неразвитой инфраструктурой вводить новые электрические и водные мощности с более подходящими для них диапазонами.

В настоящее время основным источником выработки электрической и тепловой энергии для опреснительных установок является сжигание ископаемого топлива. Однако во всем мире растет озабоченность по поводу воздействия этой практики на окружающую среду из-за выброса «парниковых газов». Хотя возобновляемые источники энергии, такие как ветер и солнечная энергия, становятся все более распространенными, их непредсказуемость и неопределенность создают проблемы с надежностью для коммерческих операций, таких как опреснение. Эти проблемы обеспечения надежности и экологического фона, а также опасения по поводу безопасности энергоснабжения и ожидаемого роста потребления энергии стимулировали интерес к разработке и расширению вариантов использования ядерной энергии для нужд опреснения [8].

Малые модульные реакторы обладают большим потенциалом для трансформации атомного опреснения. Их компактная конструкция, масштабируемость и эффективная тепловая мощность делают их подходящими для обеспечения как электрической, так и тепловой энергии для управления процессами опреснения, способствуя более устойчивому решению проблемы нехватки воды. Как упоминалось в предыдущих разделах, существует множество процессов, которые можно комбинировать с ММР для получения пресной воды из морской воды, но с точки зрения мирового опыта, наиболее популярными является обратный осмос (RO) и две технологии на основе дистилляции (MED и MSF) [9]. Однако для реализации преимуществ ММР в проектах атомного опреснения необходимы тщательное планирование, нормативные аспекты и эффективная коммуникация.

На протяжении многих лет ядерные реакторы использовались для движения, электроснабжения, теплоснабжения и опреснения в морской промышленности, например, в ледоколах, а также в некоторых инновационных проектах, таких как плавучая АЭС «Академик Ломоносов». Теоретически в качестве двигателей могут использоваться различные типы ядерных реакторов. Однако ряд практических ограничений вынудил конструктора использовать для этой цели в основном водородные реакторы. Также изучались возможности использования кипящих реакторов, но только в виде экспериментов. В настоящее время одноконтурные ядерные установки используются только на АЭС. В них этот огромный комплекс объединен в единое целое. Там огромный ядерный котел работает в паре с единственным турбоагрегатом. Весь производимый в блоке пар поступает непосредственно на турбину, а после конденсации обратно. На атомной подводной лодке первый контур - чистойшая вода, без малейших примесей, под высоким давлением для исключения возможности закипания. Во втором контуре вода, нагреваемая первым контуром, испаряется и поступает в машинное отделение в виде пара требуемых параметров.

Этот пар используется не только в главной турбине в качестве рабочего тела, но и подается на турбогенератор, холодильную установку, опреснительную установку, дроссельные увлажнители, конденсаторы для создания вакуума, насосы. Понятно, что при таком количестве оборудования и, конечно же, арматуры утечек будет много. Важной задачей является обеспечение безопасности экипажа, чего нельзя добиться одним контуром.

Были также проекты с реакторами, где в первом контуре использовался жидкий металл (смесь свинца и висмута). Служили они вполне успешно, но постоянная необходимость поддержания в реакторе температуры не ниже затвердевания теплоносителя создавала большие трудности. Приходилось либо держать установку постоянно включенной, либо использовать береговые средства, чтобы иметь внешнюю систему подачи пара. К сожалению, эти небольшие (относительно) лодки с титановыми корпусами, серией всего из шести штук, не нашли своего продолжения и дальнейшего применения. Хотя они были очень красивы и были «новым словом» в кораблестроении атомных подводных лодок. Ни одна другая страна не смогла создать подобную серию.

Развитие технологий в области водоподготовки позволяет получать пресную воду в любых условиях. В последнее время набирают популярность судовые опреснительные установки. Необходимость опреснения забортной воды на судах обусловлена потребностью в чистой воде, которая используется для хозяйственно-технических нужд. Вода для различных целей собирается и хранится в отдельных резервуарах. Для получения деминерализованной воды устанавливаются судовые опреснительные установки морской воды различного типа и мощности. Несмотря на различия в размерах и назначении ядерных реакторов морского типа и ММР, их характеристики полностью соответствуют дальнейшему применению в качестве источника энергии для опреснительных установок. В обеих системах ядерный реактор используется для выработки электроэнергии и подачи необходимого тепла. Успешный опыт такой гибридной системы, включающей ядерный реактор и опреснительные установки морской воды на морских судах и подводных лодках, может привести к строительству крупномасштабных наземных опреснительных установок.

4. Технико-экономическая оценка ядерного опреснения на основе ММР

Для проведения термодинамического анализа сочетания ММР с различными технологиями опреснения был использован расчетный код – программа МАГАТЭ по термодинамической оптимизации процессов опреснения (DE-TOP), которая уже многие годы используется учеными и инженерами для проведения термодинамического анализа. В программном обеспечении предусмотрена возможность анализа термодинамических параметров интеграции энергосистемы (здесь ММР) с опреснительной установкой как системы когенерации, в которой можно моделировать несколько конфигураций отбора тепла от ММР. После ввода характеристик системы и выбора возможных вариантов отбора пара, а также сочетания установок – программа рассчитывает многие параметры, среди которых коэффициент использования тепла когенерационной системы, количество потерь электроэнергии из-за когенерации, необходимую энергию для опреснения, а также коэффициент тепловых потерь. Однако следует отметить, что на практике невозможно извлечь любое количество горячего пара из любой точки второго контура. Это следует учитывать, если целью является моделирование системы, применимой в реальных (или близких к ней) условиях.

Второй контур АЭС с водяным охлаждением можно смоделировать с помощью программы DE-TOP в соответствии с фундаментальными термодинамическими моделями. Сформулирована термодинамическая модель с такими входными параметрами, как тепловая мощность АЭС, давление и температура острого пара,

давление конденсирующегося пара, режим работы подогревателей, температура охлаждающей воды и эффективность оборудования для оценки регенеративного цикла Ренкина с подогревом. Входные данные используются программным обеспечением для моделирования термодинамической модели электростанции путем решения уравнений всех массовых и энергетических потоков и использования встроенного пула (банка) данных теплофизических свойств, таких как температура, давление, удельная энтропия и энтальпия. В этой модели часть расширенного пара в турбине высокого давления подается на питание подогревателей высокого давления и деаэратора. Оставшийся пар после удаления влаги во влагоотделителе перегревается порцией свежего пара и направляется на ступени турбины низкого давления. Рабочий пар проходит через конденсатор, а конденсат направляется в подогреватели низкого давления и деаэратор. Далее главные питательные насосы подают воду в парогенератор через подогреватели высокого давления. Пар можно извлекать из второго контура для использования в процессах опреснения, принимая во внимание дополнительные меры безопасности через промежуточный контур. После того, как пар высвободил скрытую теплоту, сконденсированный поток возвращается в электростанцию в оптимальном месте второго контура. В этом процессе точка (или точки) отбора пара, количество доступного пара и температура должны быть проверены, чтобы убедиться, что отработанный пар может быть использован для привода установок MSF или MED с определенной производительностью по опреснению. Также необходимо учитывать дополнительное падение температуры из-за промежуточного контура.

В данном исследовании, учитывая простоту и большой мировой опыт строительства и эксплуатации легководных реакторов, в качестве энергоустановки используется ММР типа PWR. Предполагается, что мощность автономного ММР составит 100 МВт. Рассматриваются три варианта отбора пара для обеспечения необходимой тепловой энергией тепловых опреснительных установок:

- А) Пар высокого давления после парогенератора;
- Б) Отбор пара среднего давления из турбины высокого давления;
- В) Отбор пара из турбин низкого и высокого давления.

Результаты термодинамического анализа комбинации ММР с термической опреснительной установкой производительностью 15 000 м³/сут приведены в табл. 1. Минимизация энергии, затрачиваемой на опреснение осуществляется за счет использования варианта «В» в комбинации ММР с технологией MED. Отбор пара после парогенератора (вариант «А») приводит к большим потерям мощности, так как температура и давление пара после парогенератора слишком высоки, и его лучше использовать для привода турбины высокого давления для выработки электроэнергии. Сочетание опреснительной установки с ММР приводит к увеличению коэффициента использования тепла энергокомплекса примерно на 6–9 % в рассматриваемых вариантах.

Таблица 1

Результаты технико-экономической оценки

Параметр	Случаи					
	А	Б	В	А	Б	В
Технология опреснения	MED	MED	MED	MSF	MSF	MSF
Коэффициент использования тепла, %	40,7	41,9	42,7	41,8	43,2	43,6
Выработка электроэнергии, МВт	86,7	90,9	93,7	84,3	89,3	90,5
Коэффициент потерь мощности, %	37,6	25,9	18	37,6	25,9	23
Энергия на опреснение, МВт	16,1	11,9	9,1	20,6	15,7	14,5

Заключение

В настоящее время во всем мире существует проблема перехода от традиционных источников энергии из ископаемого топлива к низкоуглеродным и более безопасным. Среди многих вариантов ее решения – модернизация крупных ядерных реакторов последних поколений с помощью концепции ММР может считаться выгодной альтернативой, которая уже запланирована во многих странах. С другой стороны, многие страны испытывают дефицит пресной воды, но учитывая высокое энергопотребление опреснительных комплексов и неразвитую атомную энергетику для них использование ММР в сочетании с опреснительной установкой можно считать перспективным способом обеспечения электроэнергией и энергией для производства пресной воды в ближайшее десятилетие. В связи с этим целесообразно применять высокоэффективные методы обессоливания, чтобы максимально увеличить производительность подобных интегрированных комплексов. Согласно полученным результатам данного исследования, проект МАК с ИЯППУ-Е_{цт} может быть рекомендован не только для решения проблемы дефицита воды в некоторых регионах России (например, в Крыму), но и в основном для экспорта Россией в те страны, где дефицит воды значителен и увеличивается с каждым годом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №07-32-49301).

Список литературы

1. M. Williams, "PHYS ORG," [Online]. Available: <https://phys.org/news/2014-12-percent-earth.html>. [Accessed 10 August 2023].
2. IAEA, «Examining the Economics of Seawater Desalination Using the DEEP Code», TECDOC, Austria, 2000.
3. D. Curto and A. G. Vincenzo Franzitta, "A Review of the Water Desalination Technologies," Applied Sciences, January 2021.
4. E. Sokolova, K. Sadegi, S. H. Ghazaie, D. Barsi, F. Satta and P. Zunino, "Feasibility of Hybrid Desalination Plants Coupled with Small Gas Turbine CHP Systems," Energies, 15 May 2022.
5. A.-O. A, N. Darwish, M. Qasim, M. Tawalbeh, N. Darwish and N. Hilal, "Thirsty Energy: Water and Energy in the 21st Century," World Economic Forum and Cambridge Research Associates, Geneva, Switzerland, 2008.
6. R. S. El-Emam, H. Ozcan, R. Bhattacharyya and L. Awerbuch, "Nuclear desalination: A sustainable route to water security," Desalination, 15 November 2022.
7. "Rosatom Group," [Online]. Available: <https://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/non-nuclear-equipment-manufacturing/desalination/>. [Accessed 11 August 2023].
8. D. Ingersoll, R. Bromm, Z. J. Houghton and C. Desportes, "Integration of NuScale SMR with Desalination Technologies," in ASME 2014 Small Modular Reactors Symposium, Washington, D.C., USA, 2014.
9. IAEA, Introduction of Nuclear Desalination: A Guidebook, 2000.