

На правах рукописи



Газан Сейед Хади

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОГО ЭНЕРГОИСТОЧНИКА
ПРИ РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИЙ КРУПНОТОННАЖНОГО
ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ В РЕСПУБЛИКЕ ИРАН**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Федорович Евгений Данилович

доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Суслов Вячеслав Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы технологии и энергетики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург)

Сухоруков Юрий Германович,

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе - заведующий отделением теплообменного и схемного оборудования ТЭС и АЭС Открытого Акционерного Общества «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО "НПО ЦКТИ", г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

Акционерное Общество «Атомэнергопроект» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 21 декабря 2021 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета У.05.14.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 ПГК, ауд. 411.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбПУ, ученому секретарю диссертационного совета У.05.14.04.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.14.04,
д.т.н., с.н.с.



Куколев М.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в мире все больше возрастает масштаб проблемы обеспечения человечества пресной водой. Запасы пресноводных ресурсов велики и возобновляемы, однако масштабы их потребления также очень велики - почти на два порядка превосходят по массе потребления всех других видов природного сырья вместе взятых. Ситуация в мире также такова, что запасы пресной воды распределены крайне неравномерно, в результате чего ряд регионов Земли испытывает острую нехватку водных ресурсов. Поэтому большой интерес и важность представляет развитие технологий получения пресной воды из этих вод, и в частности, из морской воды.

Как и во многих других странах, в Иране нарастает водный кризис, связанный с рядом объективных и субъективных факторов: изменение (потепление) климата, засуха, негативное влияние плотин, построенных соседними странами, а также недостатки в организации охраны и использования водных ресурсов.

В Иране ищут способы справиться с нехваткой пресной воды. Одним из перспективных путей в решении проблем его обеспечения водой является опреснение морской воды, являющееся энергоемкой и, следовательно, недешевой технологией. В Иране есть несколько действующих опреснительных установок (ОУ) - больше всего в его южных районах, и почти все они используют ископаемое топливо (природный газ, уголь, нефть) в качестве источника энергии.

В ряде стран ядерная энергетика продолжает поставлять значительное количество электроэнергии при отсутствии вредных выбросов. Она является таким образом экологически чистым источником энергии. В начале 2019 года в мире работало около 450 атомных электростанций (АЭС).

Преимущества ядерного источника энергии для опреснения морской воды и концепции ядерного опреснения были показаны еще в разработках МАГАТЭ, начатых в 1960-х годах. Экономический анализ показывает конкурентоспособность ядерного энергоисточника в сравнении с использованием ископаемого топлива.

Используемые технологии опреснения можно разделить на

две группы – термические процессы и мембранные процессы. Многоступенчатое мгновенное вскипание (MSF) и метод многоколонной дистилляции (MED) являются наиболее популярными термическими технологиями. Среди мембранных технологий преобладает метод опреснения воды, называемый обратным осмосом (RO). В части масштабов использования среди методов опреснения процессы RO лидируют (они обладают в настоящее время ~ 53% всего мирового рынка опреснения).

К числу альтернативных и активно изучаемых в последнее время вариантов энергоустановок относятся атомные электростанции (на них могут быть установлены опреснительные приставки). Такие, а также специализированные двухцелевые комплексы, предназначенные для одновременного производства электричества в целях удовлетворения энергетических потребностей и теплоты для опреснения больших объемов соленой воды.

В связи со всем вышесказанным, крайне актуальным представляется проведение анализа и выбор наиболее энергоэффективных и экономически выгодных ОУ, действующих совместно с АЭС или действующих в составе специализированных многоцелевых комплексов (МАК).

Объект исследования. Сочетание ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с технологиями опреснения при использовании различных схем их интеграции, применительно к потребностям в энергии и воде.

Степень разработанности темы. Вопросы разработок новых технологий крупнотоннажного опреснения морской воды с использованием устойчивых энергоисточников в Иране рассматривались широким кругом исследователей: Gorjian S. (2015), Ghorbani N. (2016), Shakib S.E. (2019), Rezaei A. (2017). Однако, при выполнении работ по данной тематике, их авторы ограничивались использованием компьютерных программ для экономической оценки, которые фактически не включали гибридные технологии опреснения. Кроме того, в этих работах, как правило, не рассматривались специфические для конкретной страны (региона) условия размещения МАК, также, например, как локальная обеспеченность энергией и водой, местные природные условия и т.п. В то же время эти условия существенным образом влияют на

результаты анализа. Разработанная нами методика может быть использована и для других стран или регионов мира, где требуются технологии получения устойчивой чистой энергии и пресной воды.

Цель настоящей работы заключается в определении характеристик рекомендуемых применительно к потребностям и возможностям Ирана многоцелевых атомных энерготехнологических комплексов, предназначенных для одновременного производства энергии (электрической и тепловой) и крупнотоннажного производства пресной воды путем опреснения морской воды.

Задачи исследования:

1. Обзор и изучение современного состояния и проблем развития технологий опреснения морской воды в Иране и различных методов опреснения морской воды, которые могут быть использованы при крупнотоннажном производстве пресной воды.
2. Выбор наиболее подходящих для применения в Иране ядерно-опреснительных комплексов для целей когенерации электроэнергии и пресной воды с учетом экономических и термодинамических параметров.
3. Термозакономерное исследование различных технологий опреснения при использовании различных возможных схем интеграции ядерного энергоблока с ОУ.
4. Исследование различных схем МАК, при которых стоимость полученной пресной воды снижается путем применением различных технических приемов, таких как использование концентрата блока обратного осмоса в качестве питательной воды систем термического опреснения, использование воды, охлаждающей конденсатор турбины ЯЭУ для питания блока обратного осмоса.
5. Анализ технико-экономических показателей МАК с использованием малых модульных реакторов (SMR – small modular reactor) в Иране.

Научная и методическая новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая расчетная модель для расчета технико-экономических показателей ОУ, действующих совместно с

ЯЭУ с учетом специфических условий страны-заказчика ядерно-опреснительного комплекса.

2. Получены новые результаты исследования варианта интеграции ЯЭУ с ОУ, при котором концентрат (рассол) блока обратного осмоса используется в качестве питательной воды систем термического опреснения, позволяющего значительно снижать объемы забираемой воды.
3. Получены новые результаты исследования схемы МАК с использованием воды на выходе конденсатора турбины ЯЭУ в качестве питательной воды систем обратного осмоса, что позволит увеличивать проницаемость мембран и одновременно снизить стоимость получаемой пресной воды.
4. Получены новые результаты технико-экономического анализа использования в Иране малых модульных реакторов для обеспечения ОУ электрической и тепловой энергией; этот анализ проведен с помощью разработанной нами программы и программы термодинамической оценки ядерно-опреснительных систем DE-TOP (разработки МАГАТЭ).

Методы исследования. Методической основой данной работы является термозкономическое моделирование с целью оценки различных технологий опреснения, действующих совместно с ЯЭУ. В нашей работе при моделировании различных вариантов интеграции ЯЭУ с технологиями опреснения воды использовалась разработанная нами программа «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами» а также использовалась компьютерная программа «термодинамическая оценка ядерного опреснения» DE-TOP, которая разработана МАГАТЭ.

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность полученных в работе данных с использованием сертифицированной Санкт-Петербургским Политехническим Университетом программы «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами» подтверждается соответствием результатов, полученных с использованием известной программы DEEP, разработанной МАГАТЭ. Повышению уровня достоверности результатов работы способствует то обстоятельство, что работа была

выполнена при консультации известного высококвалифицированного специалиста - технического менеджера АЭС Бушер, профессора университета имени Шахида Бехешти в Иране, Амирсаида Ширани.

Личное участие автора заключалось в постановке задач исследования, разработке схем различных вариантов интеграции ЯЭУ с технологиями опреснения; в проведении математического расчета гибридных процессов опреснения для определения стоимости получаемой пресной воды; в интерпретации и обобщении полученных результатов при расчете каждого варианта ядерно-опреснительного комплекса; в разработке компьютерной программе для анализа характеристик ядерно-опреснительных систем.

Апробация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 3 в журналах, входящих в перечень рецензируемых ВАК научных изданий, 8 в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 5 в материалах международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа содержит 116 страниц, 61 иллюстраций, 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, научная и методическая новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту.

ГЛАВА 1. Современное состояние и проблемы развития технологий опреснения морских и солоноватых вод в Иране

Основным водным ресурсом Ирана являются атмосферные осадки. Годовое количество осадков в стране составляет 413 миллиардов кубометров, оно сильно варьируется по территории страны - от менее 50 мм в центральных регионах до около 1000 мм на побережье Каспийского моря. Выпадение осадков находится на уровне около одной трети среднегодового мирового выпадения осадков.

Метод мгновенного вскипания (Multi Stage Flash - MSF) - наиболее часто встречающаяся технология термического обессоливания морской воды. Мгновенное вскипание отличается от обычного кипения при контакте воды с поверхностью нагрева. Процесс генерирования вторичного пара происходит в свободном пространстве испарительной камеры. В современных многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания генерация пара происходит при адиабатном вскипании воды в свободном объеме при низких температурах на уровне от 40 до 110 °С.

Многоступенчатое испарение (Multi-Effect Distillation - MED) - самая старая из существующих ныне технологий обессоливания. Испарение происходит в серии камер с прогрессирующим понижением давления и температуры.

При опреснении воды методом RO морскую воду пропускают («продавливают») через полупроницаемые мембраны под воздействием давления, существенно превышающего разницу осмотических давлений пресной и морской воды. Преимущества технологии обратного осмоса заключаются в относительно низких энергозатратах, простоте конструкций аппаратов и установок, малых их габаритах и простоте эксплуатации.

Иран можно отнести к числу стран с высоким потенциалом для опреснения морской воды, однако масштабное опреснение все еще находится на ранней стадии развития в этой стране. В настоящее время в различных регионах Ирана действуют 73 опреснительные установки общей мощностью 420 000 м³/сут, и строятся 85 установок с производительностью около 400 000 м³/сут.

ГЛАВА 2. Опреснение морской воды с использованием ядерного источника энергии в Иране: настоящее состояние, потребности и перспективы

Ядерная энергетика является проверенной технологией, которая в настоящее время используется в более чем 30 странах. Большой опыт эксплуатации атомных электростанций накоплен за последние пять десятилетий.

В настоящее время Иран нуждается в большем производстве

электроэнергии. Летом 2018 года нехватка электроэнергетической мощности в стране составляла около 5000 МВт. Существует также определенный потенциал использования энергии ветра и солнца, но эти энергоисточники не используются широко. По данным Управления энергетической информации (EIA), в Иране общая выработка электроэнергии в 2015 году составила 272 ТВт·ч, и около 92% этой величины было произведено с использованием ископаемого топлива, что значительно превышает долю использования ископаемого топлива для производства электроэнергии в мире (около 66%).

Процессы производства энергии в мире главным образом основаны на ископаемом топливе, таком как уголь, нефть и природный газ. Некоторые страны Ближнего Востока в настоящее время на 100% зависят от ископаемого топлива для удовлетворения своих энергетических потребностей.

Ядерная энергия более устойчива по сравнению с другими невозобновляемыми источниками энергии. Атомный энергоисточник для опреснения в Иране имеет следующие преимущества по сравнению с остальными энергоисточниками:

- Возможность реализации любого необходимого уровня мощности от нескольких мегаватт до нескольких сотен и даже тысяч МВт.
- Экологичность – практическое отсутствие вредных выбросов CO₂, и других продуктов сгорания;
- Обеспеченность топливом на долгие годы и в особенности, если удастся организовать в промышленных масштабах замкнутый топливный цикл с ядерными реакторами на быстрых нейтронах, а также вовлечь в атомную энергетику торий как ядерное топливо.

АЭС «Бушер» (типа ВВЭР-1000) является первой АЭС не только в Иране, но и на всем Ближнем Востоке. С момента запуска АЭС в сентябре 2011 года по февраль 2014 года на ней было произведено около семи млрд кВт·ч электроэнергии. На АЭС "Бушер" действует сейчас один энергоблок с реактором типа ВВЭР-1000.

ГЛАВА 3. Возможные типы интеграции атомной электростанции с ОУ для производства энергии и опреснения морской воды (специализированный многоцелевой атомный энерготехнологический комплекс – МАК)

ОУ могут быть одноцелевыми или установками когенерации электричества и пресной воды. Энергетические ядерные реакторы всех типов в принципе подходят для использования в процессах опреснения. Пар может быть отобран из оборудования второго контура атомной электростанции и затем использован ОУ. Защитные барьеры должны быть использованы для того, чтобы предотвратить потенциальное попадание радиоактивности в опреснительную часть установки. Конденсатор электростанции ядерно-опреснительного комплекса расположен на берегу моря, забирает охлаждающую воду из моря и сбрасывает отработанную охлаждающую воду в море. На двухцелевой установке можно использовать эту нагретую морскую воду в качестве питательной воды для ОУ обратного осмоса, тем самым повышая производительность ОУ.

Подходящий (обычно используемый) температурный диапазон для опреснения составляет 65–120 °С при использовании тепловых процессов MSF и MED.

Причина преобладания водо-водяных реакторов в составе проектируемых ядерно-опреснительных комплексов очевидна – этот тип реактора освоен в эксплуатации во многих странах и показал высокий уровень безопасности и надежности. Реакторы этого типа по своим характеристикам (уровням мощностей, параметрам производимого во втором контуре пара) вполне подходят для использования в составе когенерационных систем.

Дистилляционные установки типа MSF, особенно крупные, обычно соединяются с электростанциями. При этом отработанная теплота электростанции используется для нагрева морской воды.

Технология опреснения MED относится к классу термических технологий. При опреснении воды методом MED первая (самая «теплая») ступень обычно работает при температуре ниже 70 °С, чтобы избежать образования накипи. Нагретая в конденсаторе турбины вода (или теплота отборного пара от каких-либо ступеней турбины) подается в теплообменник, где температура

питательной (опресняемой) воды повышается до необходимого уровня (от 70 до 90° С).

Сочетание атомной электростанции с промышленным процессом утилизации теплоты (в данном случае с процессом опреснения) может быть осуществлено с помощью промежуточного контура между ЯЭУ и ОУ.

ГЛАВА 4. Техничко-экономические характеристики ядерно-опреснительного комплекса

Полученные при моделировании экономические и технические характеристики объекта могут быть использованы при моделировании действий, необходимых для привлечения потенциальных инвесторов и кредиторов проекта. Основная цель и содержание данного раздела нашей работы – разработка и использование надежного метода определения технико-экономических характеристик, определение цены на опресненную воду при использовании рассматриваемой схемы сочетания ядерной и опреснительной частей комплекса.

Из-за больших различий в стоимости затрат в разных регионах / странах достаточно точные прогнозы стоимости проекта могут быть сделаны только в отдельности для каждого региона / страны. Нижеперечисленные характеристики (параметры) проекта зависят от региона / страны:

- Стоимость местного труда;
- Характеристика местных потребительских и сервисных рынков;
- Вид подрядчика-исполнителя опреснительного проекта и оценка рисков, связанных с выбором подрядчика;
- Влияние местных норм обеспечения социальной и экологической безопасности на местоположение и масштаб проекта;
- Способ забора морской воды;
- Валютные риски;
- Источники финансирования;
- Другие региональные факторы - они могут также иметь (обычно ограниченное) влияние на стоимость проекта.

Различные схемы технологии опреснения должны быть изучены в части их термодинамических и экономических

характеристик. Для этой цели могут быть использованы известные разработанные компьютерные программы. Самая известная из них — это программа DEEP, разработанная МАГАТЭ. Основные причины использования нашей методологии вместо программы DEEP заключается в следующем:

- 1) Во многих случаях упрощения и аппроксимации, предлагаемые программой DEEP, приводят к повышению неопределенности (неточности) результатов вычислений; (например, стоимость опресненной воды методом RO при различной производительности по воде получается одинаковой, что неверно).
- 2) Существуют некоторые влияющие на результат факторы, которые не учитываются программой DEEP, например, различие в стоимостях забора питательной воды и предварительной ее обработки при использовании различных методов опреснения.
- 3) Программа DEEP охватывает несколько различных схем интеграции ОУ с атомными электростанциями, однако специфические предлагаемые нами конкретные схемы интеграции не могут быть достаточно точно смоделированы с помощью DEEP, поскольку они отличаются от охватываемых программой DEEP.

Чтобы выполнить экономический анализ различных схем сочетания ЯЭУ и ОУ, нами разработана собственная гибкая компьютерная программа, основанная на языке Fortran.

Стоимость тепловой энергии рассчитывается нами с учетом снижения количества выработанной электроэнергии в результате передачи теплоты отборного пара турбины на ОУ. Разработанная нами компьютерная программа оценивает величину тепловой и электрической энергии, используя исходные данные о требуемой производительности по пресной воде, солености исходной воды и ее температуре. Затем (учитывая также и другие необходимые исходные данные) рассчитываются затраты, связанные с действием ядерной ОУ, чтобы получить цену кубического метра опресненной воды.

В предлагаемых нами схемах гибридного опреснения оценивается экономический эффект от использования рассола

одного процесса опреснения (RO) в качестве питательной воды для другого процесса опреснения (термического).

Целесообразно использовать часть охлаждающей воды конденсатора турбины атомных электростанций в качестве питательной воды систем опреснения. Такой подход приводит к значительному снижению стоимости опреснения. Температура воды на выходе конденсатора значительно выше, чем температура морской воды, что также является благоприятным фактором. Более высокая температура питательной воды на входе в мембраны приводит к лучшей проницаемости мембран.

Первая из рассмотренных нами схем имеет простую структуру. В ней технология RO и метод термического опреснения не связаны друг с другом. Каждый метод опреснения воды имеет автономную собственную систему водозабора и ее предварительной очистки. При этом питательная вода для системы RO не подогревается, а рассол системы термического опреснения не используется в качестве питательной воды мембранных систем.

Вторая из рассмотренных схем имеет целью снижение общего объема водозабора. Это позволит уменьшить требуемую мощность на прокачку воды и, следовательно, стоимость производства воды. В данной схеме концентрат (рассол) системы RO используется в качестве питательной воды для системы термического опреснения.

В третьей схеме, часть охлаждающей воды после выхода ее из конденсатора используется в качестве питательной воды систем опреснения. Преимущества такой схемы заключаются в следующем:

- Исключение забора морской воды для питания системы опреснения,
- Значительное снижение стоимости забора морской воды для ОУ,
- Увеличение проницаемости мембран систем RO благодаря повышенной температуре питательной воды (она находится примерно на уровне 36 °С),
- Энергозатраты на прокачку воды через мембраны систем RO снижаются при использовании более теплой питательной воды.

В четвертой схеме предлагается в составе МАК применять малые модульные ядерные реакторы MMP (SMR). Небольшой размер и высокая степень модульности MMP облегчают

осуществление сочетания атомной электростанции с ОУ. В частности, конструкция ММР позволяет каждому модулю работать как с мембранными, так и термическими технологиями опреснения.

ГЛАВА 5. Результаты термоэкономических расчетов различных возможных для использования в Иране систем опреснения морской воды в сочетании с ядерными реакторами различной мощности

При использовании ММР, рассмотрим три варианта отбора пара для подачи тепловой энергии, необходимой для термических ОУ:

- a) Пар высокого давления после парогенератора,
- b) Отборный пар среднего давления после части турбины высокого давления,
- c) Пар турбин низкого давления.

Результаты проведенного нами термодинамического анализа сочетания ММР с термической ОУ производительностью 15000 м³/сут приведены в таблице 1. Минимум энергии, потребляемой для опреснения, достигается при использовании варианта (с) в сочетании с технологией MED.

Таблица 1. Результаты термодинамического анализа ММР при различных вариантах отбора пара для опреснения

Параметр	a (MED)	b (MED)	c (MED)	a (MSF)	b (MSF)	c (MSF)
КПД когенерационного комплекса, %	40,7	41,9	42,7	41,8	43,2	43,6
Электрическая мощность, МВт _(эл)	96,7	100,9	103,7	94,3	99,3	100,5
Коэффициент потери мощности ¹ , %	37,6	25,9	18	37,6	25,9	23
Расход энергии на опреснение, МВт _(эл)	16,1	11,9	9,1	20,6	15,7	14,5
КПД ММР, %	34,2					
Мощность выбранного ММР,	113					

МВт _(эл)	
---------------------	--

¹отношение потери мощности из-за отбора пара к потребляемой тепловой мощности в процессе опреснения

Результаты сравнения себестоимостей опресненной воды с использованием разных схем сочетания ЯЭУ с гибридными технологиями опреснения (они подробно описаны в разделе результатов диссертации), в зависимости от производительности ОУ представлены на рисунках 1 и 2. Следует заметить, что при использовании предлагаемого ММР максимальная производительность ОУ составляет около 60000 м³/сутки.

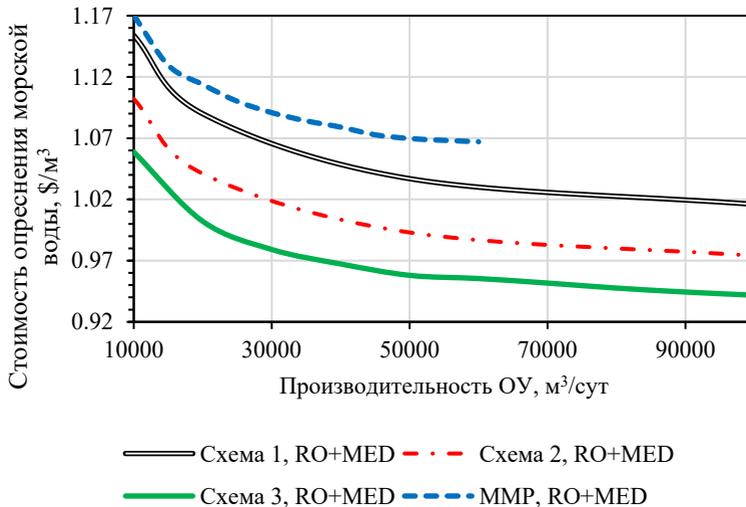


Рисунок 1. Стоимости получаемой пресной воды гибридной технологией RO+MED, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

При использовании ММР мощностью около 110 МВт_{эл}, отношение затрат на опреснения для варианта с типичным реактором большой мощности показано на рисунке 3. Стоимость опреснения с использованием одного реактора мощностью 110 МВт примерно на 10%, 14% и 19% выше для технологий RO, MED и MSF, соответственно по сравнению с ЯЭУ с реактором мощностью 1000

МВт_{эл.}. Интересный вывод, который можно сделать, заключается в том, что стоимость опреснения с использованием шести ММР в качестве МАК немного меньше, чем стоимость опреснения с использованием реактора мощностью 1000 МВт_{эл.}.

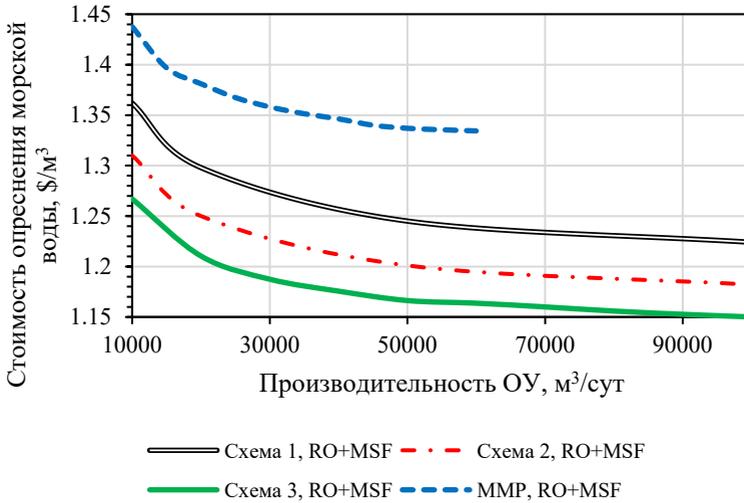


Рисунок 2. Стоимости получаемой пресной воды гибридной технологией RO+MSF, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ.

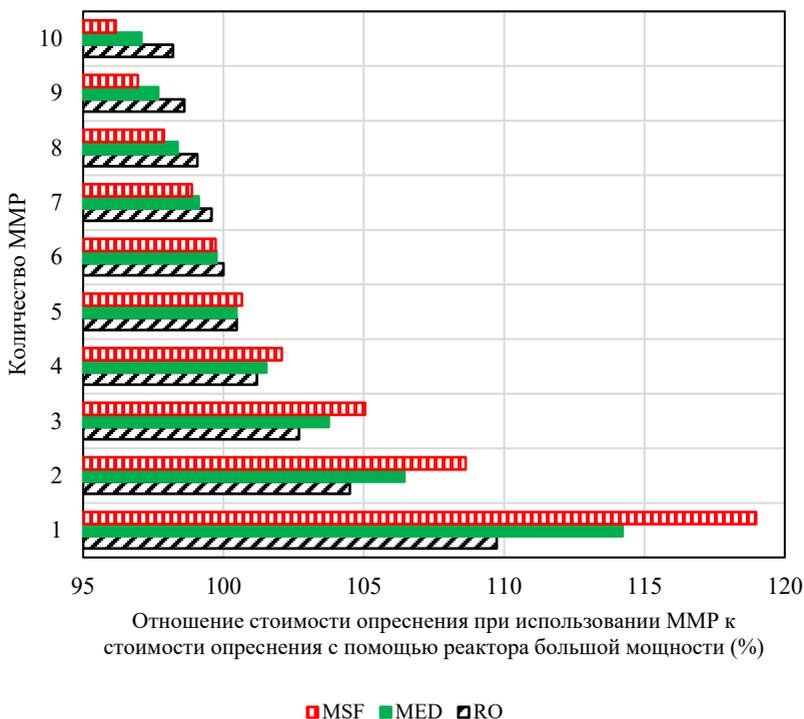


Рисунок 3. Сравнение стоимостей опреснения для разных технологий опреснения, в зависимости от количества ММР, мощностью каждого реактора 110 МВт_{эл.}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обоснованного выбора наиболее эффективных в экономическом отношении схем и систем (оборудования) двухцелевых атомно–опреснительных комплексов необходимо иметь надёжный инструмент сравнительного технико–экономического анализа вариантов этих комплексов с различными типами и мощностями как в ядерной энергетической их части (ядерный реактор, парогенераторы, паровые турбины), так и в опреснительной части, имея в виду технологию многоколонной дистилляции – MED, технологию мгновенного вскипания – MSF,

технологии обратного осмоса – RO и гибридные технологии (MED+RO и MSF+RO). В качестве такого инструмента нами разработана компьютерная программа «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами».

В главе 5 диссертации представлены результаты сравнения технических и экономических показателей вариантов ядерно-опреснительных комплексов, полученные с помощью программы «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами» а также результаты расчётов термодинамических характеристик малых модульных реакторов (ММР), охлаждаемого водой под давлением, полученные с помощью программы DE-TOP (Desalination Thermodynamic Optimization Program, разработка МАГАТЭ). Результаты сравнительного технико-экономического анализа вариантов двухцелевого ядерно-опреснительного комплекса рекомендуется использовать при проектировании таких комплексов как для Ирана, так и для других стран (при использовании исходных данных, специфических для данной конкретной страны/региона).

Рекомендуется использовать в новых разработках компьютерную программу «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами» для проведения анализа двухцелевых ядерных опреснительных систем. Программа гибкая, т.е. допускает дальнейшее обновление и добавление других возможностей расчета таких как: различные типы ядерных реакторов, использование возобновляемых источников энергии (таких как солнечная электростанция) в качестве источника энергии опреснительной установки, другие когенерационные системы, такие как системы централизованного отопления и охлаждения, производство водорода и другие неэлектрические применения.

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему:

1. Выполненный в ее обзорной части анализ современного состояния и развития крупномасштабных опреснительных производств в Иране убедительно показывает на необходимость ускоренного развития этих производств – как в связи с растущими потребностями в электроэнергии и пресной воде, так и в связи с

наличием в Иране протяжённых территорий, омываемых водами Персидского и Оманского заливов. Атомное опреснение, т. е. опреснение с использованием энергии, производимой атомными электростанциями, как нельзя лучше соответствует реализации целей такого развития, так как оно экологически чистое и позволяет экономить ценное органическое топливо (нефть, мазут, природный газ), в основном используемое в настоящее время как источник энергии опреснительных производств.

2. Наиболее эффективным вариантом отбора пара, производимого ЯЭУ для подачи тепловой энергии, необходимой для термических ОУ является использование отработанного пара турбины низкого давления. Согласно полученным результатам расчетов, при использовании ММР тепловой мощностью 330 МВт в сочетании с технологией MED производительностью 15000 м³/сут, общий КПД МАК может увеличиваться на 8,5% с мощностью производства электроэнергии 103,7 МВт.

3. Использование концентрата (рассола) систем обратного осмоса в качестве питательной воды систем термического опреснения приведет к снижению объема забираемой воды, и, следовательно, к снижению стоимости водозабора и предварительной обработки примерно на 20% при производительности 100000 м³/сут. Согласно результатам экономических расчетов, при производительности 50000 м³/сут, стоимость опреснения для ОУ MSF, MED, и RO составляет 1,99 \$/м³, 1,3 \$/м³, и 0,88 \$/м³, соответственно при конфигурации с отдельной системой водозабора для каждой технологии опреснения. В случае использовании охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ в качестве питательной воды ОУ, стоимость опреснения технологиями MSF, MED, и RO составляет 1,94 \$/м³, 1,25 \$/м³, и 0,8 \$/м³, соответственно.

4. При использовании охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ в качестве питательной воды систем опреснения, температура которой находится примерно на уровне 36 °С, степень гибридации, необходимая для получения приемлемого качества опресненной воды составляет 22%. При этом стоимость опреснения гибридными технологиями RO+MSF и RO+MED составляет 1,06 \$/м³ и 0,91 \$/м³, соответственно. Среди гибридных схем опреснения использование

охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ является наиболее экономичной конфигурацией, что приводит к снижению стоимости опреснения на 6% для технологии RO+MSF и на 7,4% для технологии RO+MED.

5. В принципе можно использовать как реакторы большой мощности, так и малые модульные реакторы в сочетании с ОУ для одновременного производства электроэнергии и пресной воды. Проводимый нами экономический анализ показывает, что, если использовать несколько модульных реакторов на одной площадке для обеспечения необходимой тепловой энергии и электричества ОУ, конкурентоспособность в части экономических показателей может быть достигнута по сравнению с реактором большой мощности. Например, при общей мощности 1000 МВт, стоимость опреснения с использованием ММР примерно на 1,5%, 3% и 4% меньше, чем стоимость получаемой пресной воды с использованием реактора большой мощности для технологий RO, MED и MSF, соответственно. Учитывая потенциальные преимущества малых модульных реакторов в качестве МАК, такие как компактность, гибкость в эксплуатации, высокая степень безопасности и меньшее время сооружения, использование ММР может быть рекомендовано таким странам, как Иран.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК

1. S. H. Ghazaie, K. Sadeghi, E. Fedorovich, E. Sokolova, and A. S. Shirani, Применение двухцелевого ядерно-опреснительного комплекса в Иране для обеспечения спроса на электроэнергию и покрытия возрастающей потребности в пресной воде // технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 3, 21, (2020).
2. K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, Е. Д. Федорович, Е. А. Соколова, А. S. Shirani, Экономическая Оценка Процессов Опреснения Воды На Энергблоке № 1 Бушерской Аэс // теплоэнергетика, 5, (2020), с 1–13.
3. K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Sokolova, E. Fedorovich, and A. S. Shirani, экономико-термодинамический анализ возможных технологий опреснения воды во втором блоке аэс "бушер" // технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2, 20, (2020).

Публикации в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science

4. S. H. Ghazaie, KH. Sadeghi, E. Sokolova, E. Fedorovich and A.S. Shirani; Comparative analysis of hybrid desalination technologies powered by SMR // *Journal of Energies*, (2020), 13, 5006.
5. S. H. Ghazaie, K. Sadeghi, E. Fedorovich, E. Sokolova, and S. Makhuhin, Assessment of the integrated nuclear plant for electricity production and seawater desalination in Iran // *Desalination and Water Treatment*, 188, (2020), P 20-30.
6. Seyed Hadi Ghazaie, Khashayar Sadeghi, Ekaterina Sokolova, Evgeniy Fedorovich, Amirsaeed Shirani, Nuclear desalination in Iran, current status and perspectives // *E3S Web Conf*, 140, (2019), 04001.
7. S. H. Ghazaie, KH. Sadeghi, E. Sokolova, E. Fedorovich and A.S. Shirani, On the use of small modular reactors integrated with thermal energy storage system for district heating, // *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (2021)*, статья принята к публикации.
8. K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Sokolova, E. Fedorovich and A.S. Shirani, Comprehensive techno-economic analysis of integrated nuclear power plant equipped with various hybrid desalination systems // *Desalination*, V 493, (2020), 114623.
9. K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Sokolova, E. Fedorovich and A. S. Shirani, Economic assessment of the possible desalination processes for the first block of Bushehr nuclear power plant // *Thermal Engineering*, 67, (2020), P 271–281.
10. Khashayar Sadeghi, Seyed Hadi Ghazaie, Ekaterina Sokolova, Evgeniy Fedorovich and Amir Saeed Shirani, Thermo-economic Assessment of the Possible Desalination Processes for the Second Block of Bushehr Nuclear Power Plant // *E3S Web Conf*, 140, (2019), 03001.
11. Kh. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Sokolova, Riccardo Chebac, Antonio Cammi, Marco E. Ricotti Implementing Hybrid Desalination System Driven by ALFRED Reactor and Solar Power Plant, Equipped with Phase Change Material Storage System: The Case of Emirate, *International Scientific Conf. on Energy // Environmental and Const. Eng. EECE 2020, LNCE 150*, (2021), p. 1–12.

Публикации в материалах международных и всероссийских конференций

12. E. A. Sokolova, E. D. Fedorovich, K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, M. V. Konushin, The use of multi-purpose atomic complexes in the countries of Middle East and North Africa // *Cyseni*, May 23-24, (2019), Kaunas, Lithuania.
13. С.Х. Газаи, Х. Садеги, Е.А. Соколова, Е.Д. Федорович; Экономическая Оценка Использования Малых Модульных Реакторов Для Обеспечения

- Опреснительной Установки Электрической И Тепловой Энергией // III-ая Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и экономика энергетики», Санкт-Петербург, (2020), P 162.
14. E. A. Sokolova, E. D. Fedorovich, K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, M. V. Konushin, перспективы создания и использовании многоцелевых атомных энерготехнологических комплексов для производства электроэнергии, теплоснабжения и крупнотонажного опреснения морской воды // Инновации в атомной энергетике: сб. тезисов докладов конференции молодых специалистов (2019), Москва, Изд-во АО «НИКИЭТ».
 15. X. Садеги, С.Х. Газаи, Е.А. Соколова, Е. Д. Федорович; Экономический Анализ Сочетания Различных Гибридных Схем Опреснительной Установки С Аэс «Бушер-2» // III-ая Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и экономика энергетики»; Санкт-Петербург, (2020), P 36-38.
 16. E. Sokolova, K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, D. Barsi, F. Satta, P. Zunino, Feasibility of Hybrid Desalination Plants Coupled with Small Gas Turbine CHP Systems // 15th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES, Cologne, Germany, (2020).

Сведения о форумах

17. Международный форум Балтийский экологический кластер «Атомная энергетика – Электромобили» Санкт-Петербург, 26 Ноября 2020 года.

Государственная регистрация программы для ЭВМ

18. Программа экономической оценки интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами. Соколова Е. А., Садеги Х., Газаи С.Х. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020610901, 21.01.2020. Заявка № 2019667664 от 30.12.2019.