

На правах рукописи



Садеги Хашаяр

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ ПРИ СОЗДАНИИ
ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ ПРИСТАВКИ К ЭНЕРГОБЛОКУ ВТОРОЙ ОЧЕ-
РЕДИ АЭС «БУШЕР»**

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 16.00 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. Проблема снабжения пресной водой в маловодных районах мира обостряется с каждым годом. Опреснение морской воды используется в качестве основного решения для удовлетворения спроса на воду в странах Ближнего Востока и Северной Африки (БВСА), в сильной степени страдающих от ее недостатка. Подобно многим странам на западе и юго-западе Азии, Иран также испытывает крайнюю нехватку воды и для того чтобы преодолеть серьезный водный кризис в засушливых регионах страны - в районе Персидского залива было построено несколько опреснительных установок. Вследствие наличия значительного количества газотурбинных установок в южном регионе Ирана, в этом регионе получили развитие опреснительные производства. В настоящее время основным источником энергии, необходимой для опреснительных установок, являются электростанции, работающие на ископаемом топливе. Опреснение морской воды - процесс дорогостоящий и требующий большого количества энергии и вредно влияющий на окружающую среду, если он основан на сжигании органических топлив. Ядерная энергетика, как самая «чистая» по сравнению с другими источниками энергии, является альтернативным энергетическим ресурсом опреснительных технологий, доступным и относительно недорогим, и привлекает к себе все большее внимание. Иран, как страна с дефицитом пресной воды, в качестве государства-члена МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) заявила о своей заинтересованности в создании опреснительной установки на базе существующей атомной электростанции «Бушер». Атомная электростанция в г. Бушер оснащена первым в стране промышленным ядерным реактором, и есть возможность включить в ее состав крупномасштабную опреснительную установку. Ее энергия может использоваться (и уже частично используется на первом энергоблоке АЭС «Бушер») в составе многоцелевого атомного комплекса (МАК) для удовлетворения спроса на энергию и питьевую воду на засушливых территориях юга страны.

Степень разработанности темы. К настоящему времени проведены многочисленные исследования интеграции ядерных

реакторов и опреснительных установок, включая технические аспекты, вопросы безопасности и экономическое обоснование опреснения морской воды с помощью ядерной энергии. Недавно авторы проанализировали возможности двухатомных электростанций (CANDU 6 и SFR) на предмет выработки электроэнергии и пресной воды. В рассмотрен высокотемпературный реактор в сочетании с установкой прямого осмоса. Авторы проанализировали различные аспекты использования опреснения на ядерных установках в Объединенных Арабских Эмиратах. В авторы сравнили экономические аспекты различных систем опреснения, размещенных на ядерных установках. Авторы исследовали пять различных способов опреснения на ядерных установках и пришли к заключению, что у каждого метода есть свои плюсы и минусы.

Однако в большинстве выполненных исследований использовалась программа DEEP, которая включает в себя значительные упрощения (как для дистилляционных, так и для мембранных опреснительных установок), что является недостатком DEEP, поскольку приводит к недостаточно точным результатам. Кроме того, в значительной части эти исследования охватывают только отдельные технологии и простую гибридную схему, не учитывая интегрированные гибридные схемы. В настоящее время в документах Организации по атомной энергии Ирана (ОАЭИ), отсутствует общий термоэкономический анализ возможных технологий опреснения воды на втором энергоблоке АЭС «Бушер».

Целью диссертационной работы является проведение технико-экономического анализа различных технологий опреснения морской воды на втором энергоблоке АЭС «Бушер». Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- ✓ Обзор состояния и перспектив обеспечения водными ресурсами в странах мира и, в частности, Ближнего Востока, включая Иран и рассмотрение различных технологий опреснения воды, их сравнение и выявление преимуществ и недостатков.
- ✓ Сравнение опреснительных установок, сочетаемых с АЭС, с опреснительными установками, сочетаемыми с ТЭС в части экономичности.

- ✓ Моделирование второго контура второй очереди АЭС «Бушер» с использованием программы DE-TOP и моделирование термических опреснительных установок сочетания с второй очереди АЭС «Бушер» и анализ термодинамических параметров этого комплекса.
- ✓ Анализ различных возможных гибридных схем опреснения морской воды для второго блока АЭС «Бушер».
- ✓ Термoeкономическая оценка различных технологий опреснения воды на втором энергоблоке АЭС «Бушер» с использованием разработанной программы.

Личный вклад автора. Все обобщения, разработка методики моделирования и расчета ядерно-опреснительного комплекса, моделирования и расчеты, результаты которых представлены в данной диссертации, были выполнены лично автором.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность результатов, полученных с использованием компьютеризированных моделей второго контура второй очереди АЭС «Бушер», разработанные с использованием программы DE-TOP подтверждена сравнением с имеющимися в литературе результатами моделирования второго контура второй очереди АЭС «Бушер».

Достоверность результатов термoeкономических расчетов обоснована надежностью разработанной нами программы экономико-термодинамического анализа ядерно-опреснительного комплекса (ЭТАЯОК), имеющей сертификат Санкт-Петербургского Политехнического университета; достоверность программы ЭТАЯОК подтверждена сравнением с результатами использования программы DEEP (разработка МАГАТЭ) при проведении сравнительных расчетов по обеим программам для тех условий (параметров, схем), для которых программы имеют одинаковую применимость.

Диссертация выполнялась при консультации со стороны технического менеджера АЭС «Бушер» и профессора университета имени Шахида Бехешти - Амирсаида Ширани, за что автор приносит ему свою искреннюю благодарность.

Методология и методы исследования. В работе использовались метод моделирования. В данной работе, при моделировании разных опреснительных установок сочетания с АЭС «Бушер» использовались пакет «DE-TOP» для определения характеристик системы опреснения и разработанная программа «ЭТОЯК» для термoeкономической оценки гибридных опреснительных схем.

Публикации. Результаты диссертации были опубликованы в 16 печатных научных работах, в том числе 3 статьи в ведущих российских рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, 8 публикации в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, 5 статей на международных конференциях и 2 статья в журнале РИНЦ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы, содержит 163 страниц текста, 61 рисунок и 31 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

Методология обоснования термoeкономической оценки опреснительных установок сочетания с второй очередью АЭС «Бушер» состоит из анализа проблемы нехватки воды в Иране, существующих методы опреснения морской воды и принципов выбора технологии опреснения и ядерное опреснение в Иране (глава1), технического анализа основного оборудования второй очереди АЭС «Бушер» (глава2), сравнительного анализа ядерного и органического источника энергии для опреснения по показателям стоимости и сравнительного анализа преимуществ и недостатков многоцелевой и одноцелевой атомной электростанции по показателям стоимости (глава3), разработки термoeкономической программы для сравнительной оценки различных методов опреснения (глава4) и термoeкономического анализа сочетания

различных опреснительных установок с второй очередью АЭС «Бушер» (глава5).

В первой главе проведен анализ нехватки воды в мире и, в частности, в Иране, основные процессы опреснения и состояние опреснения морской воды в Иране. Демографическая статистика показывает, что население планеты постоянно растет. В период между 2011 и 2050 годами предполагается рост населения мира на 33% - с 7,0 млрд до 9,3 млрд, в то время как природные водные ресурсы останутся теми же самыми. Ожидается, что к 2030 году, годовой мировой спрос на пресную воду вырастет с 4500 млрд. м³ до 6900 млрд. м³ (на 53%). Многие страны столкнутся (и многие уже сталкиваются) с серьезной проблемой удовлетворения спроса на воду.

Несмотря на большое значение пресной воды для Ирана в связи с периодическими засухами, потерей природных ресурсов воды, высушиванием подземных водоносных ключей и уменьшением количества поверхностных стоков, в настоящее время только около 500 тысяч м³ морской воды опреснено в Иране. Эта цифра эквивалентна лишь 7 литрам производимой воды на каждого иранца в день.

Как правило, крупномасштабное опреснение осуществляется одним из двух методов: дистилляцией и мембранным методом. Метод дистилляции, который также известен как метод термического опреснения, включает две основные технологии – MSF¹ (Метод мгновенного вскипания) и MED² (Многоколонное испарение). Основными технологиями мембранного метода являются обратный осмос (RO³) и электродиализ (ED⁴), однако обратный осмос более широко используется в промышленных масштабах. Гибридная технология часто используется для повышения эффективности крупных опреснительных установок.

¹ Multi-flash stage

² Multi-Effect Distillation

³ Reverse Osmosis

⁴ Electro dialysis

Она включает применение как минимум двух различных (отдельных) технологий опреснения.

Согласно терминологии МАГАТЭ, ядерное опреснение это механический и термический процесс опреснения морской воды, в котором ядерный реактор играет основную роль в подаче тепловой или электрической энергии для обессоливания морской воды. В настоящее время Иран является членом Международного агентства по атомной энергии; он выразил также свою заинтересованность в ядерном опреснении в условиях роста численности населения страны и роста ее экономики. Иранская АЭС «Бушер» является первой коммерческой ядерной энергетической установкой на Ближнем Востоке. Возможность создания крупномасштабной опреснительной приставки была рассмотрена во время строительства первого энергоблока АЭС «Бушер». На основании этого рассмотрения Организация по атомной энергии Ирана (АЕОИ) планировала производить на АЭС «Бушер» около 200 тысяч кубометров питьевой воды в день. Для удовлетворения собственных потребностей этой АЭС в пресной воде на ней уже производится 5000 кубометров пресной воды в сутки.

Во второй главе представлена общая информация об АЭС «Бушер», включая месторасположение АЭС «Бушер», общие характеристики первого блока АЭС и описание оснований обоихрудлвания установок. АЭС «Бушер» расположена на прибрежной равнине, в районе севера Персидского залива (Рис 1). Энергоблок №1 АЭС «Бушер» сооружался по проекту, разработанному российской стороной. В этом проекте использовались имеющиеся уже на площадке здания и сооружения. На этом энергоблоке используется реактор типа ВВЭР-1000 (модель В-446), модернизированный на основе опыта эксплуатации АЭС серии В-320. Четырехконтурная реакторная установка этого энергоблока использует водоохлаждаемый реактором с водяным замедлителем (ВВЭР). Предлагаемые в настоящее время в проекте энергоблока второй очереди АЭС «Бушер» технические решения основаны на выполнении требований действующих в России национальных правил и норм по безопасности в атомной энергетике, а также требований нормативных документов Ирана.



Рисунок 1: Географическое расположение площадки АЭС «Бушер»

В третьей главе анализируется влияние различных аспектов затрат на стоимость производства пресной воды наряду с использованием ядерной энергии. Результаты этого анализа могут быть использованы для создания прогнозной модели оценки стоимости пресной воды, получаемой с использованием энергии атомных электростанций. Цель этой главы состоит в том, чтобы сравнить стоимость ядерного опреснения с опреснением при использовании энергии, получаемой от сжигания ископаемого топлива и оценить преимущества использования энергии АЭС «Бушер» по сравнению с использованием энергии ископаемого топлива при производстве пресной воды. Рассмотрены также различия между одноцелевыми и многоцелевыми установками в плане стоимости продукции и проанализированы параметры, которые влияют на эту стоимость.

- I. Наличие большого количества отводимой тепловой энергии (сбрасываемой теплоты).
- II. Более высокий коэффициент нагрузки АЭС по сравнению с ТЭС.
- III. Положительный эффект от снижения конечной влажности пара.
- IV. Влияние промежуточного контура в схеме ядерной опреснительной установки положительно в том отношении, что наличие такого контура позволяет гарантированно исключить попадание активности.

V. Влияние требований обеспечения надежности опреснительной установки (постоянства водоснабжения).

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков многоцелевой и одноцелевой атомной электростанции по показателям стоимости также проводится в этой главе. Они имеют следующие экономические преимущества по сравнению с одноцелевыми установками:

- I. Меньший расход топлива
- II. Меньшие финансовые вложения
- III. Более низкие расходы на обслуживающий персонал

Однако, установки двойного назначения имеют не только преимущества, но и недостатки. Они заключаются в следующем:

- I. Меньшая общая гибкость
- II. Дополнительные сложности при выборе площадки для двухцелевой установки
- III. Более низкий коэффициент готовности
- IV. Штраф за базовую нагрузку

Основные факторы, влияющие на стоимость производства опреснительных установок, перечислены ниже:

1. Процентная ставка
2. Величина производительности опреснительной установки
3. Качество питательной воды
4. Энергопотребление опреснительного производства (ОП)
5. Тип технологии опреснения
6. Расположение опреснительной установки
7. Срок службы установки
8. Рабочая сила
9. Финансирование
10. Очистка отходов (рассола)

Четвертая глава посвящена разработке термэкономической программы для сравнительной оценки различных методов опреснения. В последние десятилетия минимизация затрат на опреснение морской воды является одной из

наиболее важных решаемых задач. В разных странах разрабатываются программы для оценки стоимости получаемой пресной воды. Из всех разработанных в этих целях программ программа DEEP (Программа экономической оценки опреснения воды) наиболее популярна. Программа DEEP разработана Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и доступна для свободного скачивания. Однако следует отметить, что программа DEEP имеет ряд недостатков. Основным недостатком программы DEEP является при моделировании гибридных схем.

Учитывая недостатки, а также необходимость реализации необходимого большего, чем в DEEP количества обновлений и опций мы совместно аспирантом СПбПУ Сейед Газаи Хади и старшим преподавателем СПбПУ - Е.А Соколовой, разработали новую собственную программу с использованием среды Intel Fortran 90, исключаящую большинство из вышеупомянутых недостатков DEEP. Наша программа имеет возможность оценки стоимости пресной воды, получаемой в опреснительных установках, входящих в состав МАК (многоцелевых атомных энергоопреснительных комплексов. Разработки различных типов МАК (в частности, с ядерными реакторами типа SMR – small modular reactors), развиваются в мире, и, следовательно, необходимо иметь методы для оценки и сравнения технико-экономических характеристик опреснительных установок, действующих в сочетании с реакторами различных типов.

В настоящем разделе нашей работы также рассматриваются несколько схем опреснительных установок, которые возможны для использования на втором блоке АЭС «Бушер». При этом рассматриваются как «чистые», так и гибридные схемы опреснения. Ниже перечислены рассмотренные нами варианты схем опреснительных установок:

- ✓ Первый вариант: Отдельные («чистые») схемы опреснения MED, MSF и RO;
- ✓ Второй вариант: Простая гибридная схема;
- ✓ Третий вариант: Интегрированная гибридная схема¹;

¹ Integrated hybrid system

- ✓ Четвертый вариант: Использование охлаждающей воды конденсатора АЭС в качестве питательной воды опреснительной установки.

В первом варианте только одна из технологий опреснения используется в опреснительном комплексе, т. е. MED, MSF или RO. Принцип простой гибридной схемы заключается в использовании технологии RO одновременно с одной из технологий MSF или MED в опреснительном комплексе.

Интегрированная гибридная система отличается от простой гибридной системы тем, что ОУ спроектирована и действует как единая, а не как ОУ с отдельными системами опреснения в простой схеме. Главной особенностью этой схемы является то, что прошедшая через установку обратного осмоса вода поступает на вход установки MED или MSF в качестве питательной воды.

При увеличении температуры питающей воды скорость проникновения воды через мембрану увеличивается. Таким образом, повышение температуры питающей воды приводит к повышению эффективности установки обратного осмоса. На втором блоке АЭС «Бушер» проектная средняя годовая температура воды на выходе из конденсатора составляет около 37 °С. В диссертации представлены графические схемы четырех вариантов. В качестве примера на рисунке 2 представлена общая схема четвертого варианта, состоящей из термической установки и установки обратного осмоса. Пояснительная информация к этому рисунку дана в таблице 1.

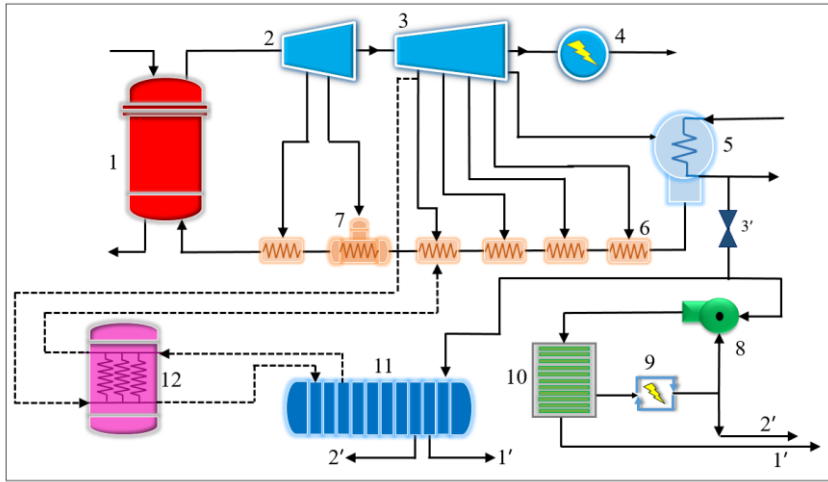


Рисунок 2: Схема четвертого варианта опреснительной установки в сочетании с второй очередью АЭС «Бушер»

Таблица 1. Пояснения к Рис. 2

№поз. на рис.2	Вид оборудования	№поз. на рис.4.3	Вид оборудования
1	реактор	9	насос
2	Парогенератор	10	Насос высокого давления
3	Турбина высокого давления	11	Система рекуперации энергии
4	Турбина низкого давления	12	Установка RO
5	Генератор	13	Промежуточный теплообменник
6	Конденсатор	14	Установка термического опреснения
7	Подогреватель питательной воды	1'	Трубопровод пресной воды

8	Деаэратор	2'	Трубопровод рассола
---	-----------	----	------------------------

В пятой главе изложены результаты применения разработанной программы к термозкономическому анализу сочетания различных опреснительных установок с второй очередью АЭС «Бушер». В данной главе анализ термодинамических и экономических аспектов опреснения морской воды во вторичном контуре АЭС «Бушер» выполняется программой DE-TOP и экономической программой (ЭТАЯОК). Программа DE-TOP разработана Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). В качестве первого шага мы смоделировали второй контур АЭС «Бушер» и получаем основные параметры теплоносителей и рабочих тел в разных точках контура. На рисунках 3 представлен тепловой баланс, полученный в результате моделирования в программном пакете DE-TOP.

Для того, чтобы обеспечить потребляемую энергию опреснительных установок, необходимо извлечь пар из подходящих точек системы второго контура АЭС. Программа DE-TOP позволяет выбирать точки отбора пара и возврата конденсата.

Сочетание опреснительной установки с атомной электростанцией образует систему когенерации. Общая эффективность (КПД) этой системы выше, чем у одноцелевой электростанции. На рисунке 5 представлена эффективность когенерационной системы АЭС «Бушер» при различной производительности и технологии опреснения. Экономический анализ возможных схем опреснения морской воды на АЭС «Бушер» осуществляется нами с использованием нашей экономической программы.

В таблице 6 приведены экономические результаты расчетов для различных технологий опреснения для производительности по воде 50000 ($\text{м}^3 / \text{сут}$). (Следует отметить, что все расчеты в диссертации получены для 4 различных мощностей (50000, 100000, 150000, 200000 ($\text{м}^3 / \text{сут}$)))

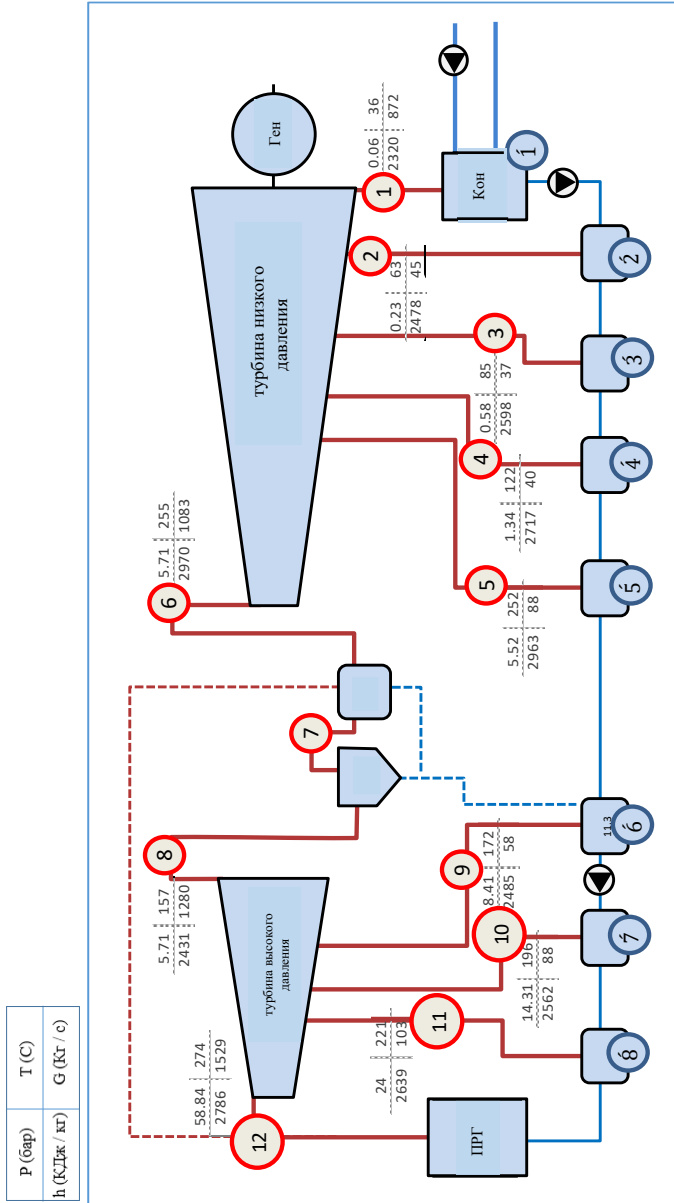


Рисунок 3: Тепловая схема, полученная в результате моделирования в программном пакете DE-TOP и возможные точки для отбора и отвода пара для термических опреснительных установок

Важным следующим шагом является сравнение различных возможных схем с экономической точки зрения. Общие сравнения для всех возможных гибридных схем представлены в таблице 8. Это сравнение выполняется для четырех различных производительностей. Выбраны степени гибридизации 0,2, 0,3 и 0,4.

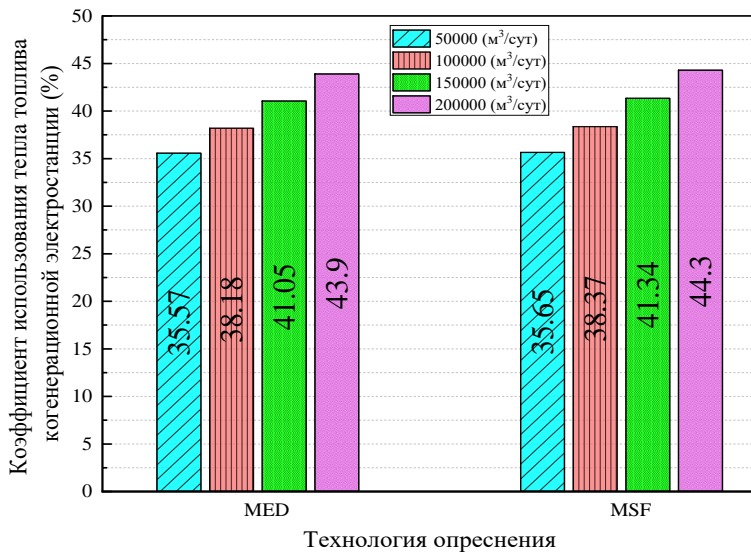


Рисунок 4: Эффективность когенерации на АЭС «Бушер» для различных технологий опреснения и различных производительностях по пресной воде

Таблица 2: Результаты экономических расчетов для различных технологий опреснения и для производительности по воде 50000 (м³ / сут)

	Технология опреснения		
	RO	MED	MSF
Капитальные затраты на опреснительную установку			
Общие базовые затраты на опреснительную Установку (\$/м ³)	0.285	0.423	0.450
Общая стоимость владения (\$/м ³)	0.014	0.021	0.022
Непредвиденные расходы (\$/м ³)	0.029	0.044	0.047
Проценты во время строительства (\$/м ³)	0.059	0.088	0.093
Общие капитальные затраты (\$/м ³)	0.389	0.577	0.613
Затраты на энергию			
Стоимость тепловой энергии (\$/м ³)	0	0.417	0.90
Стоимость электроэнергии (\$/м ³)	0.259	0.144	0.24
Общая стоимость энергии (\$/м ³)	0.259	0.561	1.15
Стоимость эксплуатации и обслуживания			
Управленческие расходы (\$/м ³)	0.008	0.009	0.009
Стоимость рабочей силы (\$/м ³)	0.030	0.034	0.034
Стоимость материалов (\$/м ³)	0.1654	0.070	0.07
Стоимость страхования (\$/м ³)	0.030	0.031	0.033
Общие эксплуатационные расходы (\$/м ³)	0.165	0.144	0.146
Общая годовая стоимость (M\$)	13.71	18.96	28.27
Общая стоимость воды (\$/м ³)	0.83	1.283	1.912

Таблица 3: Общее сравнение возможных гибридных схем

Схема	Производительность (м ³ /сут)	Стоимость получаемой воды (\$/м ³)					
		MED+RO (0.2)	MSF+RO (0.2)	MED+RO (0.3)	MSF+RO (0.3)	MED+RO (0.4)	MSF+RO (0.4)
Вторая	50000	0.963	1.089	1.005	1.194	1.047	1.299
	100000	0.938	1.064	0.982	1.171	1.025	1.276
	150000	0.925	1.051	0.969	1.158	1.0113	1.265
	200000	0.918	1.044	0.963	1.152	1.007	1.259
Третья	50000	0.952	1.078	0.989	1.178	1.025	1.277
	100000	0.928	1.054	0.965	1.154	1.003	1.255
	150000	0.914	1.040	0.953	1.142	0.991	1.243
	200000	0.908	1.034	0.946	1.135	0.985	1.237
Четвертая	50000	0.879	0.924	0.924	1.113	0.968	1.220
	100000	0.862	0.907	0.907	1.096	0.952	1.204
	150000	0.853	0.898	0.898	1.087	0.943	1.195
	200000	0.848	0.894	0.894	1.082	0.939	1.191

Рекомендации по использованию результатов. В связи с растущим спросом на пресную воду в различных регионах Ирана, большим опытом установки атомной электростанции в Иране (Бушере), подходящими отношениями между Ираном и Россией, а также полученными результатами нашего исследования, можно настоятельно рекомендовать провести еще несколько исследований при проектировании и сооружении третьего и четвертого энергоблоков энергоблока АЭС «Бушер». Эти результаты позволяют выбрать наилучшие по эффективности варианты сочетания ядерной и опреснительной частей упомянутого комплекса с использованием различных технологий опреснения (технологий MED, MSF, RO и гибридных - RO+MED, RO+MSF).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических исследований и анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Обзор состояния и перспектив обеспечения водными ресурсами в Иране показывает, что создание крупномасштабных опреснительных установок сочетания с АЭС играет основную роль в экономическом развитии и безопасности страны.
2. Согласно термодинамическим расчетам, потеря мощности из-за отбора пара в точке 12 (перед турбиной высокого давления) больше, чем при отборе в точках 6 и 8 (Рис 4). Например, для производительности $50000 \text{ м}^3 / \text{сут}$, потеря мощности из-за отбора пара в точке 12, на 36 процентов больше, чем Потеря мощности из-за отбора пара в точке 6. Коэффициент потери мощности при отборе пара из точки 12 на 35% и 40% больше чем при отборе пара из точек 6 и 8, соответственно.
3. При сочетании термической опреснительной установки с второй очередью АЭС «Бушер», коэффициент использования тепла топлива когенерационной электростанции увеличивается. Например, для производительности $50000 \text{ м}^3 / \text{сут}$, этот показатель с 33% повышается до 35,5% для технологии MED. При более высоких производительностях опреснительной установки эффективность системы когенерации выше.
4. При сочетании термической опреснительной установки с второй очередью АЭС «Бушер», можно выбрать несколько точек отбора пара, чтобы минимизировать потери мощности электростанции. Коэффициент потери мощности при выборе равных вкладов потока пара из точек больше чем в случае, когда вклады не равные.
5. Основные результаты экономического анализа различных предложенных схем можно суммировать следующим образом. Стоимость получаемой воды по технологии RO меньше, чем по технологиям MED и MSF. Стоимость получаемой воды по технологии MSF на 56% и 32% дороже чем технологии RO и MSF, соответственно. Стоимость получаемой воды по четвертой схеме (использование охлаждающей воды основного конденсатора АЭС в качестве питательной воды опреснительной установки) в любом случае ниже, чем для другой возможной

гибридной схемы. На основании результатов выполненных нами расчетов можно рекомендовать для реализации в составе ядерно-опреснительного комплекса на базе энергоблока второй очереди АЭС «Бушер» использование охлаждающей воды конденсатора АЭС в качестве питательной воды опреснительной установки, как наиболее предпочтительное по экономическим соображениям.

6. При использовании охлаждающей воды конденсата АЭС «Бушер» в качестве питательной воды установки РО с температурой 36 градусов, качество получаемой воды ухудшается по сравнению с температуры 25°C. В этом случае способом повышения качества получаемой воды является смешивание получаемой воды из установки РО с водой, получаемой из термических установок. Для того чтобы получить требуемое качество воды при выборе температуры 36, степень гибридизации должна составлять 22%.
7. Проведено сравнение стоимостных показателей опреснения воды с использованием ядерного и ископаемых видов топлива для опреснительной установки в г. Бушер. В качестве источников энергии для этого анализа рассмотрены нефть и уголь, газовая турбина, парогазовая установка и АЭС с ВВЭР-1000. сделал вывод, что наилучший вариант термического метода соответствует МЕД с процентной ставкой 5%, который реализуется с помощью ядерной энергии он лучше любого варианта термического опреснения с использованием ископаемого топлива. При использовании технологии обратного осмоса наилучшим вариантом опять же является получение пресной воды с помощью ядерной энергии. Общие затраты на производство воды на угольной электростанции и в комбинированном цикле примерно соответствуют варианту ВВЭР. Результаты расчетов показывают, что использование электростанции, работающей на жидком топливе, абсолютно не выгодно для производства пресной воды методом РО.
8. Представленные в настоящей диссертации результаты технико-экономического анализа многоцелевого атомного энерготехнологического комплекса, использующего энергию энергоблока АЭС «Бушер» (республика Иран) и предназначенного для одновременного производства

электрической энергии и опреснения морской воды, могут быть использованы также при проектировании и сооружении третьего и четвёртого энергоблоков этой электростанции. Эти результаты позволяют выбрать наилучшие по эффективности варианты сочетания ядерной и опреснительной частей упомянутого комплекса с использованием различных технологий опреснения (технологий MED, MSF, RO и гибридных - RO+MED, RO+MSF).

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Государственная регистрация программы для ЭВМ:

1. Программа экономической оценки интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами (The program of economic assessment of the integrated nuclear power plans with the desalination systems). 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.

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК:

1. K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, E. Д. Федорович, E. А. Соколова, A. S. Shirani, Экономическая Оценка Процессов Опреснения Воды На Энергоблоке № 1 Бушерской Аэс // теплоэнергетика, 5, (2020), с 1–13.
2. 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).
3. 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).

Публикации в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science:

4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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)*, Принято.
 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 Conference on Energy // Environmental and Construction Engineering EECE 2020, LNCE 150*, (2021), p. 1–12.

Публикации в материалах международных и всероссийских конференциях:

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. 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».
14. 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), Р 36-38.
15. С.Х. Газаи, X. 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), Р 162.
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,