

На правах рукописи



Садеги Хашаяр

**Сравнительный анализ использования различных технологий
опреснения морской воды при создании опреснительной приставки к
энергоблоку второй очереди АЭС «Бушер»**

Специальность – 05.14.04 – Промышленная Теплоэнергетика

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы

Санкт-Петербург

2022

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ

Калютик Александр Антонович,
к.т.н., доцент ИЭ СПбПУ

Научный руководитель:

Калютик Александр Антонович,
к.т.н., доцент ИЭ СПбПУ

Рецензент:

Лычаков Виталий Дмитриевич,
к.т.н, заместитель руководителя
Испытательного центра энергетического
оборудования ОАО "НПО ЦКТИ"

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».
- ✓ Термоэкономическая 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.

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 18 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.

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.

На данный момент весь Аравийский полуостров и страны Персидского залива погружены в глубокий водный кризис. Этим государствам, несмотря на их высокую степень экономического развития, не хватает пресной воды. Согласно статистике, уровень потребления пресной воды на душу населения в этих государствах в несколько раз превышает среднемировой показатель. Вода становится даже более важным стратегическим ресурсом, чем нефть и газ. Уже сейчас тонна чистой воды в странах с засушливым климатом стоит больше, чем тонна нефти. Обеспечение водной безопасности – одно из основных условий дальнейшего развития этого региона. Страны Аравийского полуострова, входящие в Совет сотрудничества арабских государств Персидского залива (ССАГПЗ, далее – страны Залива), за исключением Омана, характеризуются большим дефицитом водных ресурсов. Недостаток возобновляемых водных ресурсов в этом регионе сопровождается малым количеством осадков, высоким уровнем испарений, а запасы подземных вод невозобновляемы. На рисунке 1 представлен уровень т.н. водного стресса в

мире (потребление пресной воды в отношении к её возобновляемым ресурсам в процентах).

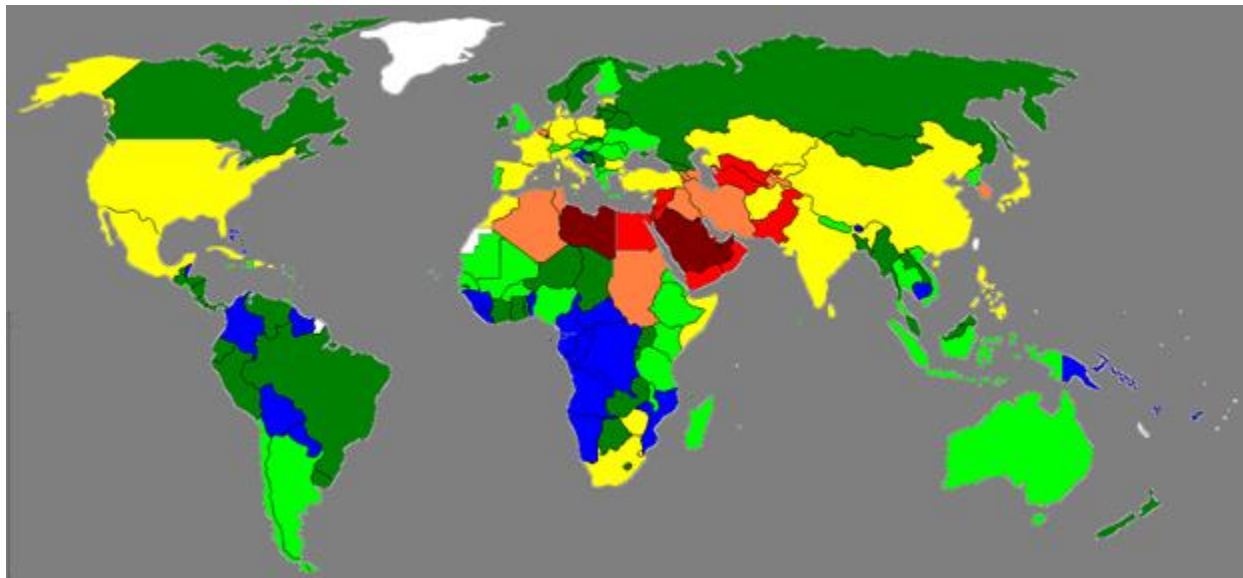


Рисунок 1: Уровень водного стресса в мире

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.

Нехватка пресной воды может быть ликвидирована в регионах, расположенных вблизи морей и океанов посредством опреснением морской воды. Разработки технологий крупнотоннажного опреснения морской воды начались в мире с середины двадцатых годов прошлого столетия, и, главным образом, в странах, расположенных в регионах с нехваткой воды, таких как Ближний Восток и Северная Африка. Следует заметить, что большинство стран на Ближнем Востоке богаты ископаемыми энергоресурсами, которые можно использовать в опреснительных установках.

В настоящее время в мире каждый день опресняется около 90 миллионов м³ воды и эта пресная вода производится примерно 18500 опреснительными установками. Саудовская Аравия, Соединенные Штаты, Объединённые Арабские Эмираты (ОАЭ) и Кувейт обладают самыми высокими в мире опреснительными мощностями. Три страны ССАГПЗ – Саудовская Аравия, ОАЭ и Кувейт обладают третью частью мирового потенциала опреснения воды. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), около 58% мировых мощностей по опреснению приходится на Ближний Восток и Северную Африку (рис. 2).

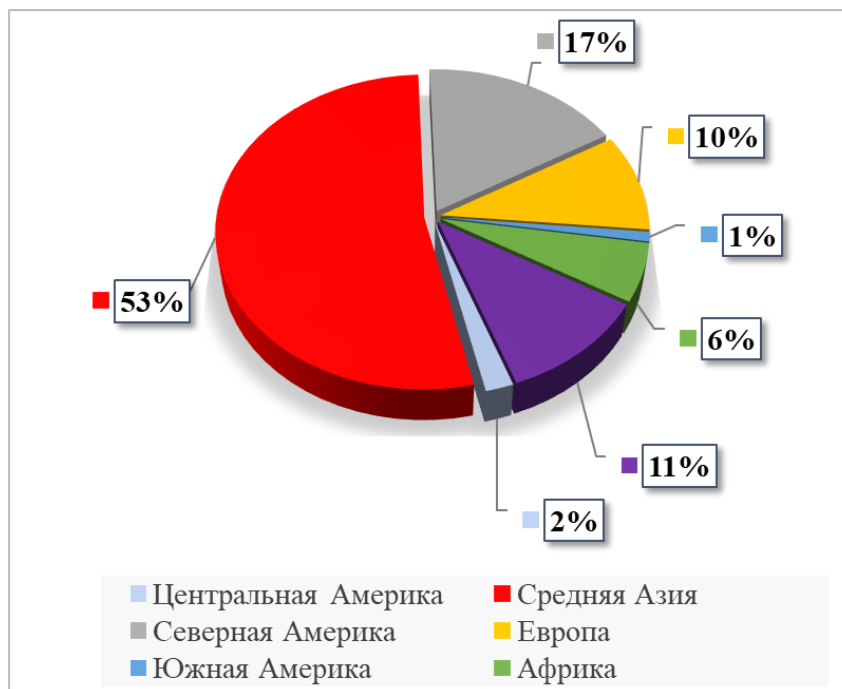


Рисунок 2: Распределение опреснительных производств по географическим районам мира

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 (ED), 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

Вклад каждой технологии опреснения воды в мировое производство представлен на рисунке 3. Согласно этому рисунку, технология RO занимает первое место в этом производстве.

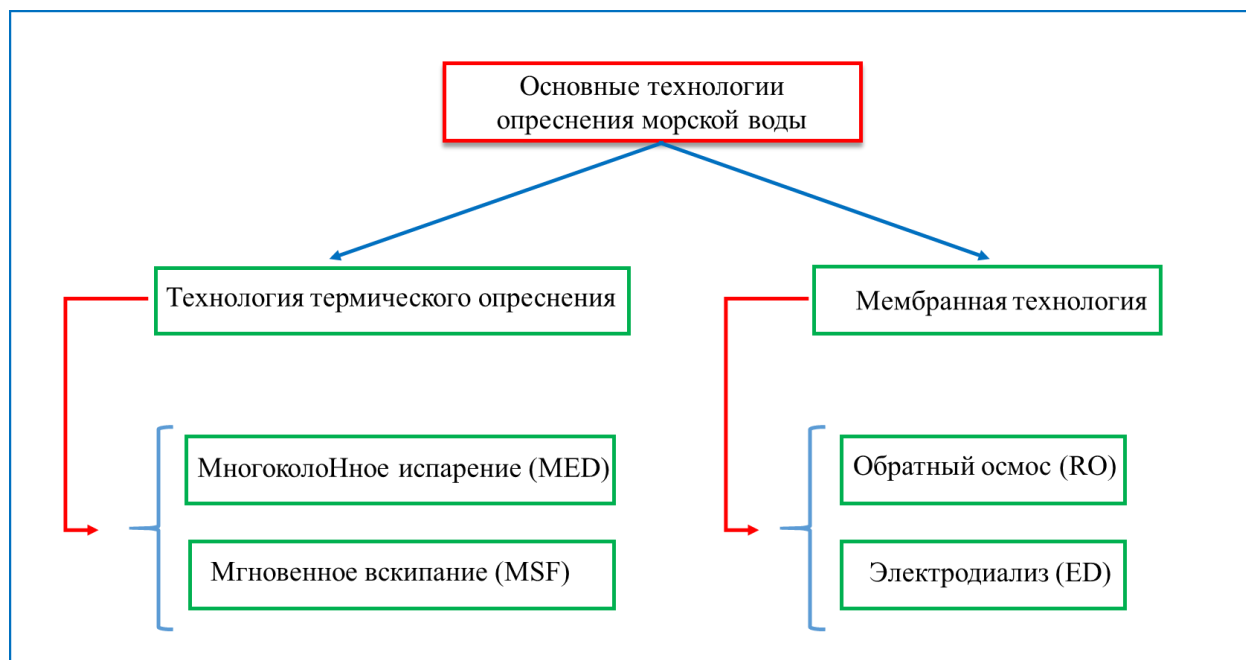


Рисунок 3: Основные коммерческие технологии опреснения морской воды

Термические методы традиционно широко используются для опреснения морской воды. Основой процесса является перевод воды в паровую фазу с последующей конденсацией пара на охлаждаемой поверхности. Большинство дистилляционных испарительных установок действуют либо за счет адиабатного многоступенчатого испарения, либо за счет мгновенного вскипания.

Технология MSF доминировала в мире в период с 1980-х по 1990-е годы благодаря высокому качеству продукта и доступности ископаемого топлива в странах Ближнего Востока. Технология опреснения в установке мгновенного вскипания отличается от использования обычного кипения при контакте воды с поверхностью нагрева, что имеет ряд преимуществ. Установки мгновенного

вскипания выполняются многоступенчатыми. Это обусловлено тем, что при использовании этой технологии температура проходящей в отдельной ступени предварительно нагретой опресняемой воды понижается незначительно, и поэтому при одноступенчатом испарении для обеспечения заданной производительности потребуется подать большое количество воды, а теплоту образующегося рассола потерять безвозвратно. В многоступенчатой схеме за счет регенерации теплоты и рациональной рециркуляции рассола удастся существенно снизить расход теплоты. В установке MSF потребляется как тепловая, так и электрическая энергия. Эти типы установок могут дистиллировать очень соленую воду (до 70000 мг/л) до солесодержания в 5-25 мг/л.

В современных многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания генерация пара производится за счет адиабатного вскипания воды в свободном объеме при низких температурах (110...40 °С). Морская вода проходит последовательно, от последней ступени - к первой, через конденсаторы, встроенные в испарительные камеры с пониженным давлением. Нагреваясь за счет тепла конденсации, она поступает в головной подогреватель. В первой испарительной камере вода нагревается выше температуры кипения и вскипает. Пар конденсируется на поверхности трубок конденсатора, конденсат стекает в поддон, а неиспарившаяся вода перетекает через гидрозатвор в следующую камеру. Давление в каждой последующей камере ниже, чем в предыдущей, этот процесс продолжается по всей длине аппарата. Число камер в установке достигает сорока и более. Выбор величины температуры, до которой рассол нагревается в первой камере, является важным фактором при проектировании. Обычно она варьирует от 90°С до 120°С. Чем выше температура рассола и поверхности нагрева, тем ниже

капитальные затраты и выше эффективность процесса. При эксплуатации установки мгновенного вскипания в стандартном диапазоне температур 90...110 °С удельная поверхность теплопереноса составляет 200...300 м²/(кг/с).

Методом мгновенного вскипания производится от 6 до 11 кг дистиллята на 1 кг затраченного пара. Заводы, работающие по технологии мгновенного вскипания, относительно просты по дизайну и эксплуатации. Предварительная подготовка воды заключается в ее грубой очистке на сетчатых фильтрах, последующей фильтрации через фильтры с загрузкой: необходим ввод кислоты и химических реагентов для предотвращения образования накипи. Концентрат обычно сбрасывается в море. Дистиллят имеет очень низкую минерализацию и практически стерилен. Срок эксплуатации испарителей порядка 40 лет. Типичные производительности заводов: 20...60 тыс. м³/сут, самые крупные - 200...800 тыс.м³/сут.

Метод мгновенного вскипания используют, в частности, крупные муниципальные опреснительные заводы в регионе Персидского залива. Часто технология мгновенного вскипания используется при комбинированном производстве тепловой, электрической энергии и обессоленной воды.

технология Многоколонного испарения - самая старая из существующих технологий обессоливания. В ней испарение также происходит в серии камер с прогрессирующим понижением давления и температуры. Внутри каждой камеры опресняемая вода впрыскивается (подается) на поверхность пучка теплообменных труб, а греющий пар проходит внутри труб и конденсируется. На внешней поверхности трубок тонкая пленка морской воды абсорбирует тепло пара и закипает. Нагрев и испарение воды в первой ступени осуществляются паром котла, работающего на дистилляте; греющим паром

следующей ступени служит вторичный пар предыдущей испарительной камеры. Перед тем как поступить в камеру следующей ступени, пар проходит через сепаратор для улавливания захваченных капель морской воды. Процесс повторяется по всей длине установки. Высокая эффективность процесса достигается благодаря высокой интенсивности теплообмена в тонком слое нагреваемой жидкости и малому времени контакта с ее теплопередающей поверхностью, незначительным затратам энергии на проведение процесса, а также низким значениям начальной температуры нагрева воды.

В мире в эксплуатации находятся несколько разновидностей установок данного типа. В вертикально-пленочных установках организация пленочного течения внутри трубной поверхности достигается за счет размещения в каждой трубке специальных насадок, создающих щелевой канал для жидкости. После истечения через щель пленка жидкости в гравитационном потоке омывает поверхность трубки, нагреваемую с наружной стороны. Преимущества установок данного типа - высокие коэффициенты теплопередачи и отсутствие циркуляционных насосов. Однако устойчивость режима парообразования в стекающей пленке при большой длине труб (до 3 м) недостаточно высокая, т.к. на концевых участках труб наблюдается режим захлебывания пленки, что приводит к снижению коэффициента теплопередачи и падению производительности.

Более благоприятно протекает процесс пленочной дистилляции в установках с горизонтально-трубчатыми аппаратами, в которых образование пленки происходит на горизонтально расположенной трубной поверхности при подаче на эту поверхность опресняемой воды из специальных устройств. Подача воды может быть безнапорной (гравитационной), либо осуществляться специальными соплами, работающими под давлением.

Преимущества установок данного типа: высокое количество вырабатываемого пара на единицу длины трубной поверхности, достаточно низкие эксплуатационные рабочие параметры и температурные перепады, простая геометрическая компоновка поверхностей, низкий расход электроэнергии на собственные нужды.

Отладка систем орошения теплообменных труб, выбор рационального водно-химического режима работы, организация направленного движения пара в межтрубном пространстве и выбор оптимальной скорости пара между трубами при поперечной взаимной схеме движения потоков пара и опресняемой жидкости в межтрубном пространстве позволяют обеспечить длительную и высокоэффективную эксплуатацию реализованных к настоящему времени установок.

Явление осмоса лежит в основе процесса обмена веществ любого из живых организмов: в каждую живую клетку поступают питательные вещества, а обратно выводятся метаболиты. Все эти процессы осуществляется через так называемые полупроницаемые мембраны, которые способны пропускать молекулы одних веществ и препятствовать прохождению через них молекул других веществ.

Сущность явления осмоса заключается в следующем. Если по разные стороны полупроницаемой мембраны, способной пропускать только молекулы воды и задерживать молекулы соли, находятся водные растворы солей с разной концентрацией, то молекулы воды будут перемещаться через мембрану из слабо концентрированного раствора в более концентрированный. При этом если оба раствора находятся под внешним, одинаковым давлением (например, атмосферным), то из-за явления осмоса, т.е. в результате процесса проникновения воды через мембрану, наблюдается повышение уровня

жидкости в более концентрированном растворе. Эта разница в высоте уровней двух растворов разной концентрации пропорциональна силе, под действием которой вода проходит через мембрану. Эта сила называется «осмотическим давлением». Если же на раствор с большей концентрацией начать воздействовать внешним давлением, которое будет превышать осмотическое, то молекулы воды начнут двигаться через полупроницаемую мембрану в обратном направлении, то есть из более концентрированного раствора в менее концентрированный. Этот процесс называется «обратным осмосом». Если же приложить внешнее давление равное бесконечности, то теоретически можно «передавить почти всю воду» из более концентрированного раствора, и, таким образом, разделить исходный раствор на «чистую и грязную воду».

Хотя технология обратного осмоса стала достаточно распространенным методом очистки воды, механизм транспортировки соли и воды через мембрану остается постоянным объектом для дискуссий и поиски совершенствования процесса и технологии RO продолжают.

Агрегаты RO доступны в широком диапазоне мощностей благодаря их модульной конструкции. Большие опреснительные заводы состоят из сотен систем (модулей), которые размещены в стойках. Типичная максимальная производительность крупной установки составляет 128 000 м³/сутки, однако маленькие установки (до 0,1 м³/сутки) также используются на морских судах, в домах или гостиницах.

Типичная система RO состоит из четырех основных подсистем (Рис. 4):

- Система предварительной обработки питательной воды;
- Насос высокого давления;
- Мембранные модули;

- Система последующей обработки опресненной воды.

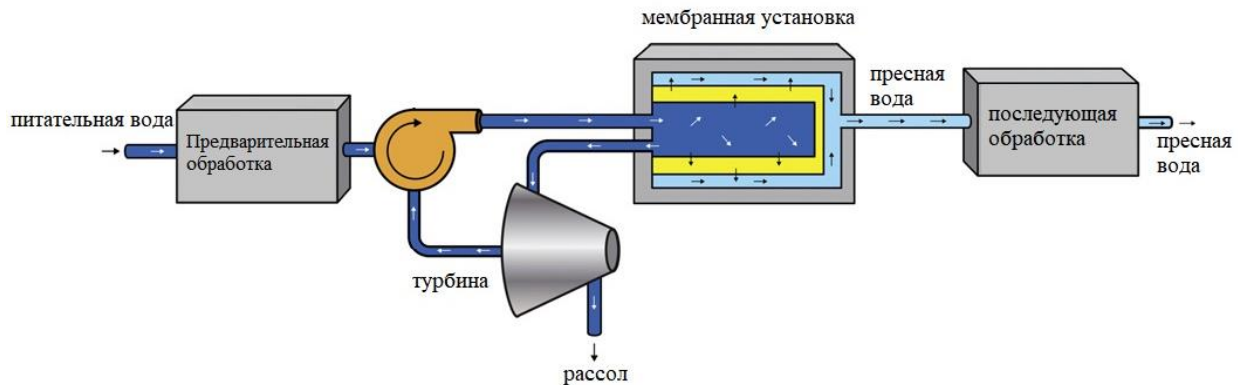


Рисунок 4: Подсистемы в системе обратного осмоса

Во второй главе представлена общая информация об АЭС «Бушер», включая месторасположение АЭС «Бушер», общие характеристики первого блока АЭС и описание оснований обихрудлвания установок. АЭС «Бушер» расположена на прибрежной равнине, в районе севера Персидского залива (Рис 5). 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 5: 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 опреснительной обеспечения установки надежности (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 термоэкономической программы для сравнительной оценки различных методов опреснения. В последние десятилетия технологии получения пресной воды с использованием ядерной энергии интенсивно развиваются в некоторых странах мира. При этом минимизация затрат на опреснение морской воды является одной из наиболее важных решаемых задач. В разных странах разрабатываются программы для оценки стоимости получаемой пресной воды. Некоторые из этих программ применимы только к опреснительным установкам термического типа, но большинство включают также рассмотрение установок мембранного типа. 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. Она может быть полезна для оценки стратегий опреснения путем расчета технических характеристик опреснительных установок и затрат при различных конфигурациях ядерно-опреснительных комплексов. Рассматриваемые ее технологии опреснения включают технологии MSF, MED и обратный осмос (RO), а также гибридные варианты (RO-MSF, RO-MED) с различными вариантами сочетания источников энергии в виде ядерного топлива, органического топлива, возобновляемых источников и сетевого электричества (при автономном RO). Однако следует отметить, что применяемая в DEEP методология включает в себя существенные упрощения (как для дистилляционных, так и для мембранных опреснительных установок), что является недостатком DEEP, поскольку приводит к получению недостаточно точных результатов.

Основными недостатками программы DEEP можно назвать следующие:

- ✓ Программа DEEP основана на использовании среды Microsoft Excel. Из-за большого количества расчетных формул и параметров в таблицах Excel осуществить изменение какой-либо формулы или какого-либо алгоритма чрезвычайно трудно, а иногда даже невозможно. Кроме того, гибкость программы невысока, и внести в нее дополнительные расчетные схемы невозможно.
- ✓ Большая часть процедур экономико-термодинамических расчетов в DEEP основана на оценочных (приближенных) методах: во многих случаях программа использует средние значения параметров, разброс значений которых велик. Это относится, например, ко всем термодинамическим параметрам второго контура АЭС с реактором PWR (ВВЭР). Кроме того, большая часть термодинамических формул этой программы устарела, и их использование приводит к значительным ошибкам в результатах.
- ✓ Основным недостатком программы DEEP проявляется при моделировании гибридных схем. В настоящее время на опреснительных установках мира использование гибридных методов опреснения (т. е. методов, основанных на сочетании тепловых и мембранных технологий) находит все большее применение. Хотя в программе DEEP существует возможность рассмотрения гибридных методов, вследствие ее недостатков эта возможность используется в неполной мере.
- ✓ Использование DEEP приводит к ошибкам при демонстрации ряда результатов, таких, например, как величина капитальных затрат, доля стоимости RO в гибридных методах и т. д.
- ✓ В руководстве пользователя DEEP указано, что эта программа может быть использована при оптимизации стоимости получаемой пресной воды. Однако, к сожалению, для неоптимизированных схем опреснения

(например, при неиспользовании сбросной энергии охлаждающей воды на выходе из конденсатора электростанции), эта возможность практически не может быть реализована.

- ✓ Учитывая указанные 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, исключая большинство из вышеупомянутых недостатков DEEP. Основные преимущества нашей программы по сравнению с программой DEEP заключаются в следующем:
- ✓ Высокая гибкость программирования на языке Intel Fortran 90, что облегчает ее способности к применению пользователем.
- ✓ В нашей программе использованы более современные зависимости для определения термодинамических и других расчетных характеристик опреснения, таких как GOR, число ступеней в системах MED и MSF и т. д.
- ✓ Чтобы представить влияние количества забранной морской воды и сбросного рассола на общую стоимость опреснения, нами были разработаны новые зависимости, которые заменяют зависимости, используемые в DEEP.
- ✓ Главной особенностью нашего кода является возможность технико-экономического сравнения различных гибридных схем. Наша программа применима к четырем различным вариантам гибридных схем, однако их количество может быть увеличено в будущем. Для каждой из этих схем были разработаны расчетные зависимости.

- ✓ 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.

Следует также отметить, что наш код разработан таким образом, что его можно при необходимости модифицировать.

В настоящей главе диссертации представлена методология экономической оценки различных методов опреснения воды, использующих энергию атомной электростанции. Эта методология включает использование моделей как дистилляционных, так и мембранных опреснительных установок. Рассматриваются также экономические аспекты различных возможных гибридных схем. Рассмотрение термодинамических характеристик второго контура атомной электростанции в Бушере также выполнено и его результаты представлены в последующей главе диссертации.

По своей сути экономическая оценка любого МАК делится на две части: экономическая оценка АЭС и экономическая оценка ОУ. В нашей методологии экономической оценки, которая может быть отнесена к разряду методов "power credit", учитывается стоимость электроэнергии, вырабатываемой электростанцией, и определяется термодинамическая и экономическая эффективность комбинированного производства энергии и пресной воды. В настоящей главе сначала дается описание методики экономической оценки термической и мембранной технологии опреснения в

отдельности, а затем дается описание методики оценки этих двух технологий в их сочетании. Принципы экономической оценки тепловых методов (MSF и MED) и метода RO аналогичны друг другу. При разработке методологии в тех случаях, если требуются какие-либо изменения применительно к технологии RO — это обсуждается специально.

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 схема;
- ✓ 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, что приводит к улучшению качества получаемой воды по сравнению с «чистой» схемой RO и одновременно к снижению стоимости получаемой пресной воды. Рисунок 6 демонстрирует типичную простую гибридную схему, состоящую из термической установки и установки

обратного осмоса. Пояснения к этому рисунку приведены в таблице 1. Как видно из рис. 6 - термические и мембранные установки в этом случае полностью независимы, и рабочие условия каждой из них не влияют на рабочие условия другой. Трубопровод для забора воды из моря в каждой системе опреснения свой. Эта опция не использует предварительного нагрева питательной воды системы RO и, следовательно, эффективность установки обратного осмоса путем предварительного нагрева воды в этом случае не может быть повышена.

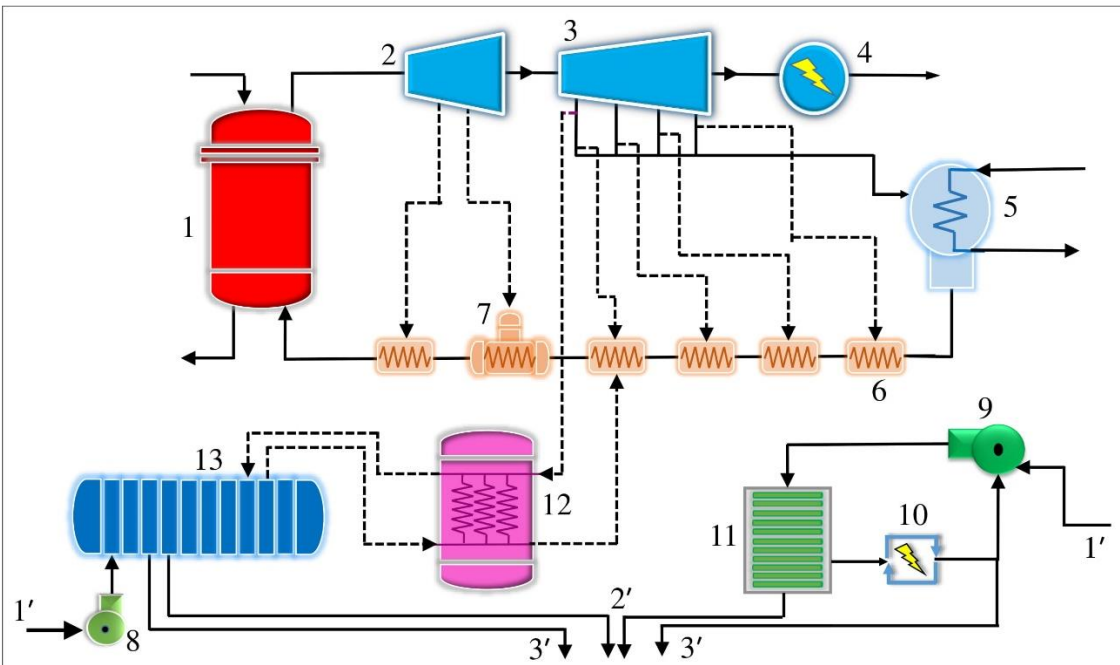


Рисунок 6. Простая гибридная схема опреснения воды, которая может быть использована на Бушерской АЭС (II).

Таблица 1: Пояснения к Рис. 6

№ поз. оборудования из рис.4.1	Вид оборудования	№ поз. оборудования из рис.4.1	Вид оборудования
1	Парогенератор	9	Насос высокого давления
2	Турбина высокого давления	10	Система рекуперации энергии
3	Турбина низкого давления	11	Установка RO
4	Генератор	12	Промежуточный теплообменник
5	Конденсатор	13	Установка термического опреснения
6	подогреватель воды второго контура	1'	Трубопровод питательной воды
7	Деаэратор	2'	Трубопровод пресной воды
8	Насос	3'	Трубопровод рассола

В гибридных схемах одним из параметров, от которых зависит стоимость производимой воды, а также зависит ее качество, является степень гибридации. Степень гибридации — это отношение количества произведенной пресной воды системой термического опреснения к общему количеству генерируемой воды. Степень гибридации обычно определяется для двух различных принимаемых сценариев - зимнего и летнего. Обычно вода, полученная в опреснительной установке, на выходе из этой установки смешивается в общем резервуаре хранения. Следовательно, конечное качество воды — это осредненное качество, зависящее от вклада (доли) производства воды каждой из систем в общую производительность установки по отношению к их объему. Мировой опыт эксплуатации гибридных систем

показывает, что при доле в 30-40% от общего количества произведенной воды, приходящейся на системы MSF или MED), и при доле 60-70% от общего количества произведенной воды, приходящейся на систему RO обеспечивается подходящее для питьевых нужд качество воды.

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. Такое объединение двух опреснительных систем имеет несколько преимуществ. Главной особенностью этой схемы является то, что прошедшая через установку обратного осмоса вода поступает на вход установки MED или MSF в качестве питательной воды. В предлагаемой нами схеме ОУ основная (первичная) питательная вода отбирается из моря только по одному трубопроводу, который подключен к установке обратного осмоса. Стоимость забора морской воды зависит от ее расхода, поэтому при анализе этой схемы оптимизируем расход забираемой воды, таким образом, чтобы минимизировать общую стоимость получаемой воды. На рис. 7 представлена интегрированная гибридная схема. Как видно из этого рисунка, основной трубопровод водозабора подключен к установке обратного осмоса. Питательная вода термической установки подается по трубопроводу WBM. В тех случаях, когда требуется увеличить расход питательной воды, используется трубопровод WBP.

Исходные данные для анализа этой схемы следующие:

1. Коэффициент извлечения RO-установки задан.
2. Температура морской воды на входе постоянна.
3. Рабочие параметры установки MED или MSF заданы.

2	Турбина высокого давления	13	Установка термического опреснения
3	Турбина низкого давления	WTOT	Трубопровод общей питательной воды
4	Генератор	WFM	Трубопровод питательной воды установки RO
5	Конденсатор	WBP	Трубопровод дополнительной питательной воды термической установки
6	подогреватель воды второго контура	WBM	Трубопровод питательной воды термической установки от RO
7	Деаэратор	WFD	Трубопровод общей питательной воды термической установки
8	Насос	WTH	Трубопровод получаемой пресной воды из термической установки
9	Насос высокого давления	WRO	Трубопровод получаемой пресной воды из установки RO
10	Система рекуперации энергии	WDRC	Трубопровод общей получаемой пресной воды
11	Установка RO	WBD	Трубопровод рассола

Основным источником потерь энергии на электростанциях является охлаждающая вода на выходе конденсатора турбины. Этот огромный источник энергии можно утилизировать – использовать полезным образом. Одним из них является использование охлаждающей воды конденсатора АЭС в качестве питательной воды для опреснительной установки. При увеличении температуры питающей воды скорость проникновения воды через мембрану

увеличивается, поскольку вязкость питательной воды уменьшается и скорость диффузии воды через мембрану увеличивается. Таким образом, повышение температуры питающей воды приводит к повышению эффективности установки обратного осмоса.

Третий контур АЭС «Бушер» включает в себя конденсатор, трубопроводы впускной и выпускной воды конденсатора и систему очистки охлаждающей воды. На втором блоке Бушерской АЭС проектная средняя годовая температура воды на выходе из конденсатора составляет около 37 °С.

Известно, что при использовании охлаждающей воды конденсатора в качестве питательной воды для установки обратного осмоса степень извлечения пермеата (RR) мембран увеличивается.

Дополнительным преимуществом использования охлаждающей воды конденсатора в качестве питательной воды для опреснительной установки является нулевая стоимость забора воды из моря. При этом, однако, должны быть учтены расходы на предварительную обработку питательной воды для установки RO. Рисунок 8 демонстрирует схему четвертого варианта, состоящей из термической установки и установки обратного осмоса. Пояснительная информация к этому рисунку дана в таблице 3.

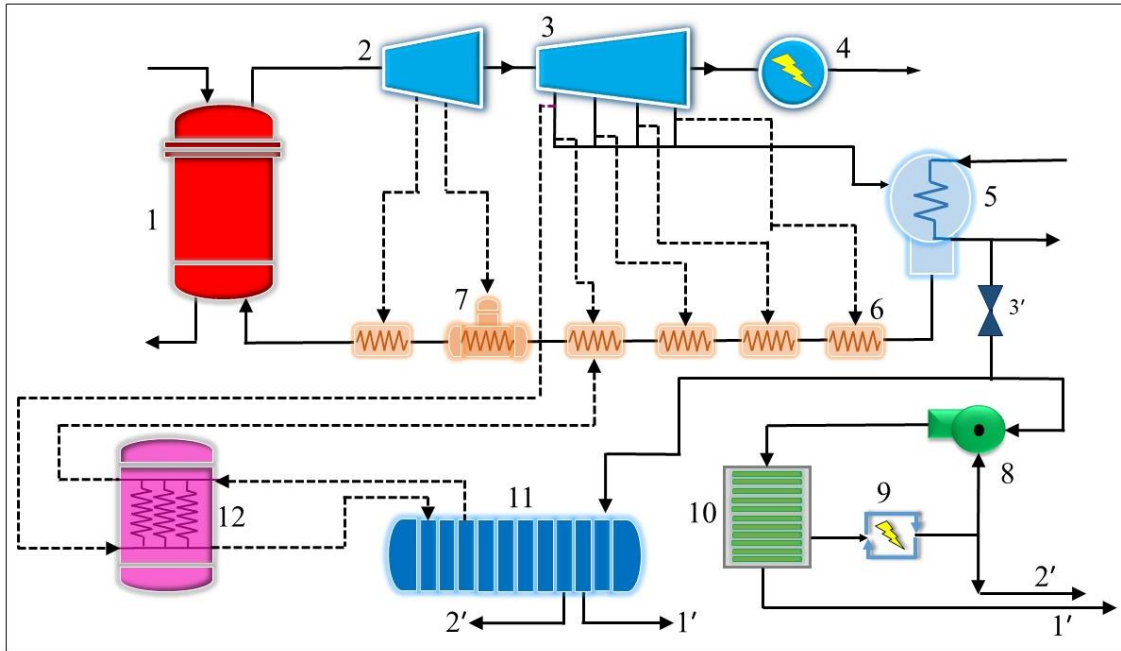


Рисунок 8: Схема четвертого варианта опреснительной установки в сочетании с второй очередью АЭС «Бушер»

Таблица 3. Пояснения к Рис. 8

№поз. на рис.4.3	Вид оборудования	№поз. на рис.4.3	Вид оборудования
1	Парогенератор	9	Система рекуперации энергии
2	Турбина высокого давления	10	Установка RO
3	Турбина низкого давления	11	Установка термического опреснения
4	Генератор	12	Промежуточный теплообменник
5	Конденсатор	1'	Пресная вода
6	Подогреватель питательной воды	2'	Вода на входе в конденсатор
7	Деаэратор	3'	Охлаждающая вода из конденсатора АЭС
8	Насос высокого давления		

В пятой главе изложены результаты применения разработанной программы к термоэкономическому 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 9 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 10 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 4 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 ($\text{м}^3/\text{сут}$))).

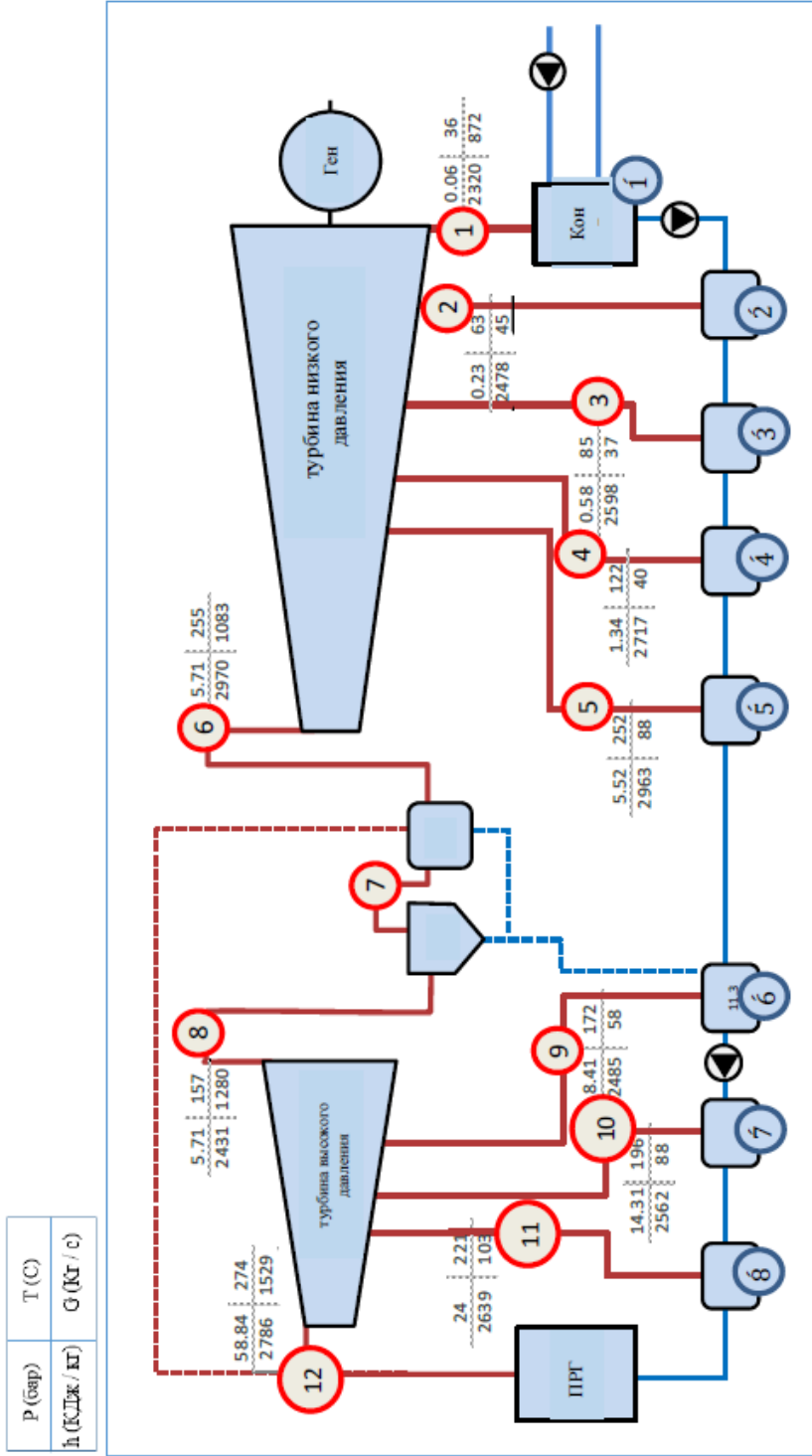


Рисунок 3: Тепловая схема, полученная в результате моделирования в программном пакете DE-TOP и возможные точки для отбора и отвода пара для термических опреснительных установок

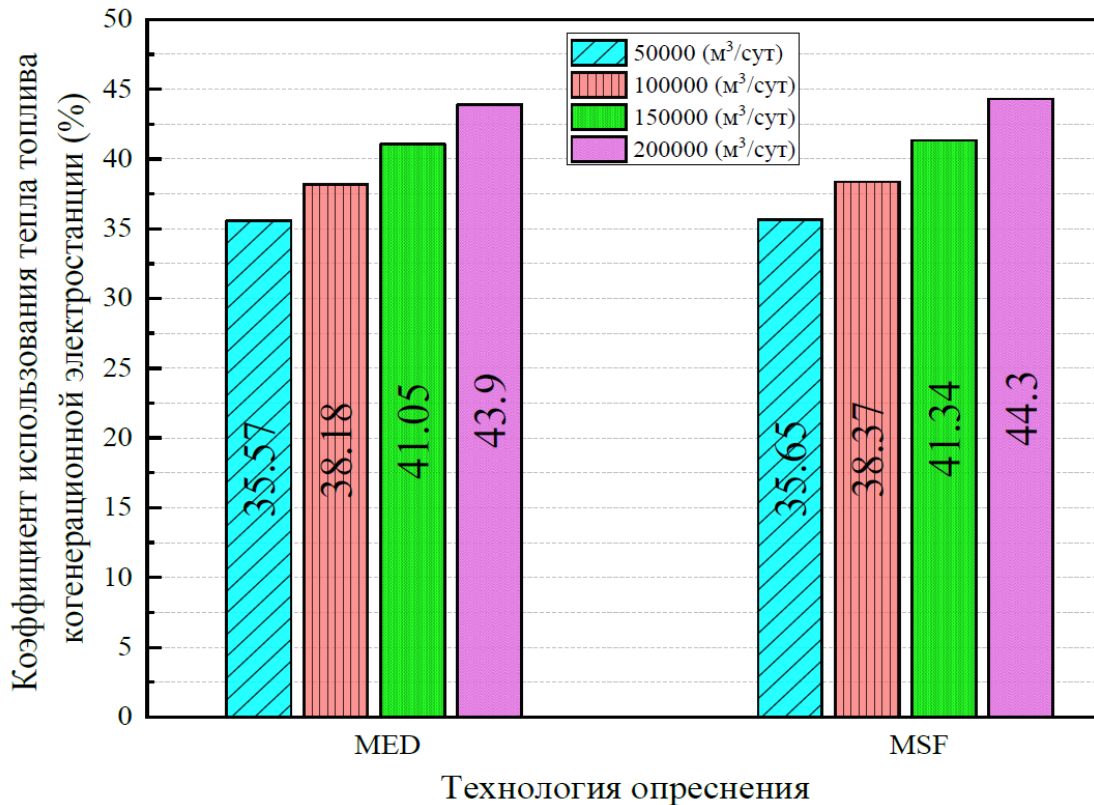


Рисунок 10: Эффективность когенерации на АЭС «Бушер» для различных технологий опреснения и различных производительностях по пресной воде

Повышение температуры питательной воды установки технологии RO снижает общую стоимость получаемой воды. Однако эффект увеличения температуры не всегда положительный. Качество получаемой пресной воды (солесодержание) также является одним из наиболее важных параметров, который следует учитывать при создании любой ОУ. Требуемое качество зависит от цели использования воды. Питьевая вода должна иметь солесодержание не более 300 мг/л. Качество получаемой пресной воды в термической установке (MED и MSF) может быть ниже 25 мг/л.

Таблица 4: Результаты экономических расчетов для различных технологий опреснения и для производительности по воде 50000 (м³/сут)

	Технология опреснения		
	RO	MED	MSF
<u>Капитальные затраты на опреснительную установку</u>			
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
<u>Затраты на энергию</u>			
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
<u>Стоимость эксплуатации и обслуживания</u>			
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

Качество получаемой воды из установки технологии RO зависит от температуры питательной воды. На рисунке 11 представлены три различных параметра: степень извлечения пермеата RO-установки (RR) в зависимости от температуры, качество получаемой воды из RO-установки в зависимости от температуры и требуемое качество для питьевой воды. Как видно из этого рисунка, качество получаемой воды из установки RO при температурах ниже 33°C находится ниже зоны требуемого качества. В этом случае одним из

лучших способов повышения качества получаемой воды является смешивание получаемой воды из установки RO с водой, получаемой из термических установок. При этом следует учитывать, что общая стоимость получаемой воды из термической установки превышает стоимость воды, получаемой из установки RO. Следовательно, степень гибридизации должна быть оптимизирована. Эта оптимизация представлена на рисунке 12. На рисунке 12 представлены два разных параметра: минимальная степень гибридизации для получения воды требуемого качества и качество получаемой воды при этой степени гибридизации.

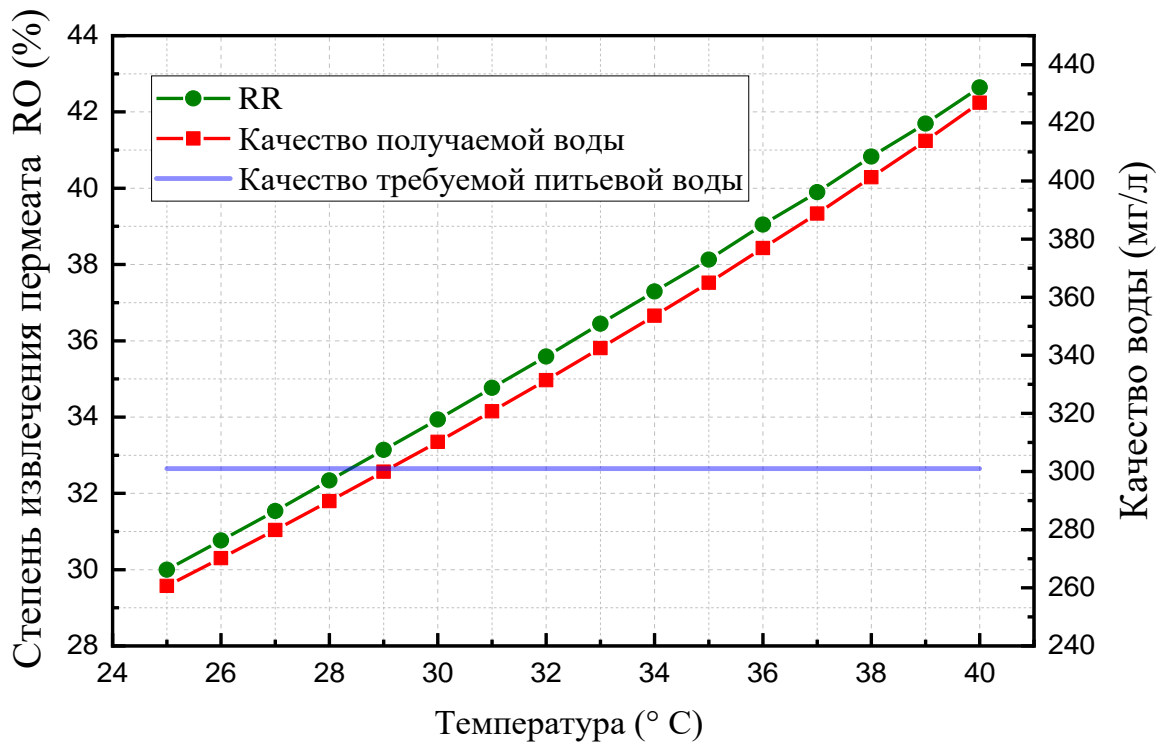


Рисунок 11: Степени извлечения пермеата RO-установки (RR) в зависимости от температуры, качество получаемой воды из RO-установки в зависимости от температуры и требуемое качество питьевой воды.

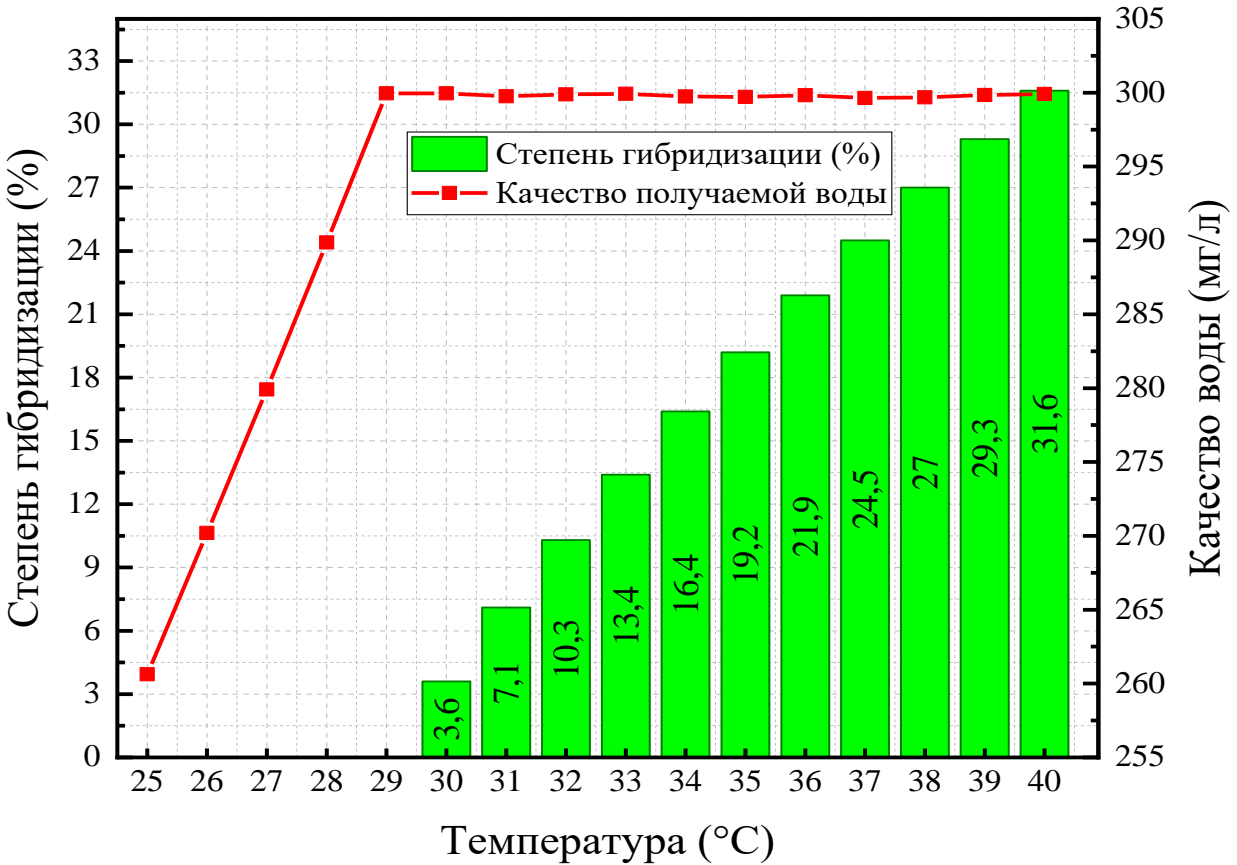


Рисунок 12: Минимальная степень гибридации для получения воды требуемого (питьевого) качества и качество получаемой воды при этой степени гибридации (четвертый вариант)

Важным следующим шагом является сравнение различных возможных схем с экономической точки зрения. Общие сравнения для всех возможных гибридных схем представлены в таблице 5. Это сравнение выполняется для четырех различных производительностей. Выбраны степени гибридации 0,2, 0,3 и 0,4.

Таблица 5: Общее сравнение возможных гибридных схем

Схема	Производительность (м ³ /сут)	Стоймость 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 в сочетании 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 9). Например, для производительности 50000 м³ / 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 м³ / 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 RO с температурой 36 градусов, качество получаемой воды ухудшается по сравнению с температурой 25°C. В этом случае способом повышения качества получаемой воды является смешивание получаемой воды из установки RO 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 MED 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 RO.

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 четвертого 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. A. 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.

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. Газай, 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. Газай, 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,