

На правах рукописи



Газан Сейед Хади

**Исследование возможностей и перспектив использования
атомного энергоисточника при развитии технологий
крупнотоннажного опреснения морской воды в Республике
Иран**

Специальность – 05.14.04 – Промышленная Теплоэнергетика

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Задачи исследования:

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

Научная и методическая новизна работы заключается в следующем:

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

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

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

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

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных в работе данных с использованием сертифицированной Санкт-Петербургским Политехническим Университетом программы «экономическая оценка интегрированных атомных электростанций с опреснительными системами» подтверждается соответствием результатов, полученных с использованием известной программы DEEP, разработанной

МАГАТЭ. Повышению уровня достоверности результатов работы способствует то обстоятельство, что работа была выполнена при консультации известного высококвалифицированного специалиста - технического менеджера АЭС Бушер, профессора университета имени Шахида Бехешти в Иране, Амирсаида Ширани.

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

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

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

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

1.1. Дефицит пресной воды в мире и в Иране. Водные ресурсы Ирана

Дефицит пресной питьевой и используемой для орошения полей воды в мире знаком человечеству с древнейших времён; с конца двадцатого века он рассматривается как одна из глобальных проблем современности. По мере роста численности населения нашей планеты значительно увеличивались масштабы водопотребления, и, соответственно, водodefицита, что стало приводить к ухудшающимся условиям жизни и замедлило экономическое развитие стран, испытывающих этот дефицит. 70% населения мира в настоящее время страдает от дефицита воды как минимум один месяц в году (см. Рис. 1.1). В связи с растущим загрязнением источников воды, ростом населения, освоением новых

территорий и наступления пустынь встаёт задача искусственного получения необходимого количества пресной воды. В настоящее время для этого используют главным образом следующие способы:

- опреснение морской воды с использованием различных энергоресурсов;
- конденсация водяных паров из воздуха, в том числе с использованием более холодной глубинной морской воды;
- конденсация водяного пара из воздуха в аккумуляторах холода, в частности — в аккумуляторах естественного происхождения, таких как пещеры в прибрежных скалах.

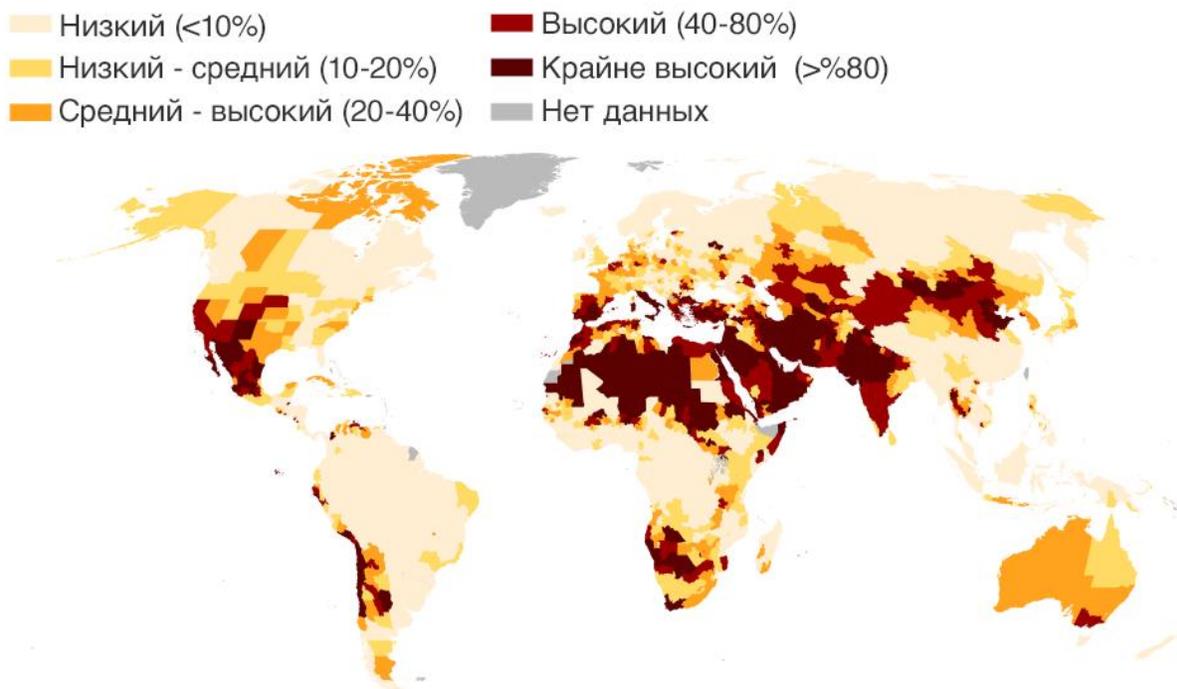


Рисунок 1.1. Карта дефицита пресной воды в мире

1.1.1. Географическое положение Ирана

Иран расположен в юго-западной Азии на стыке Ближнего и Среднего Востока. С севера территория страны омывается Каспийским морем, с юга - Персидским и Оманским заливами. Иран граничит по суше с семью государствами: Азербайджаном, Арменией, Афганистаном, Ираком, Пакистаном, Туркменистаном, Турцией; а также делит акваторию Каспийского моря с Россией и Казахстаном, акваторию Персидского залива - с Кувейтом, Саудовской Аравией, Катаром, Бахрейном, акваторию Оманского залива - с Оманом (см.

Рис. 1.2). По площади территории (1648000 км²) Иран занимает 17-е место в мире. На территории Ирана поместились бы пять таких стран, как Германия.



Рисунок 1.2. Географическое положение Ирана

1.1.2. Климат регионов Ирана

Климатические особенности регионов Ирана определяются его географическим положением на азиатском континенте и преобладанием горного рельефа, препятствующего влиянию океана. Достаточное количество осадков получают только высокогорный район Загрос и побережье Каспийского моря, где распространено богарное земледелие. Лето повсеместно жаркое со средней температурой по стране 27-32 °С. Дневные температуры нередко достигают 32-38 °С, ночью они опускаются до 16-21 °С. На высотах более 1500 м воздух прогревается значительно слабее. Значительно более заметны зимние различия в температурном режиме между северной и южной частями страны. На севере, за исключением полосы вдоль Каспийского моря, зимы холодные и снежные, на юге они

мягкие и теплые. Средние январские температуры составляют в Тегеране 2°C. На юге дневные температуры зимой изменяются от умеренных до теплых, а ночью опускаются приблизительно до 11-14 °C.

1.1.3. Водные ресурсы Ирана

Из-за засушливого климата и гористого рельефа Иран испытывает недостаток водных ресурсов. Основным водным ресурсом страны являются атмосферные осадки. Годовое количество осадков в стране составляет 413 миллиардов кубометров, оно сильно варьируется по территории страны - от менее 50 мм в центральных регионах до около 1000 мм на побережье Каспийского моря (см. Рис. 1.3). Выпадение осадков находится на уровне около одной трети среднегодового мирового выпадения осадков. Жаркие и сухие климатические условия Ирана также обусловлены географически. В результате эвапотранспирация водных ресурсов в Иране значительно выше средних мировых показателей - более чем две трети из осадков испаряется через несколько дней после выпадения.

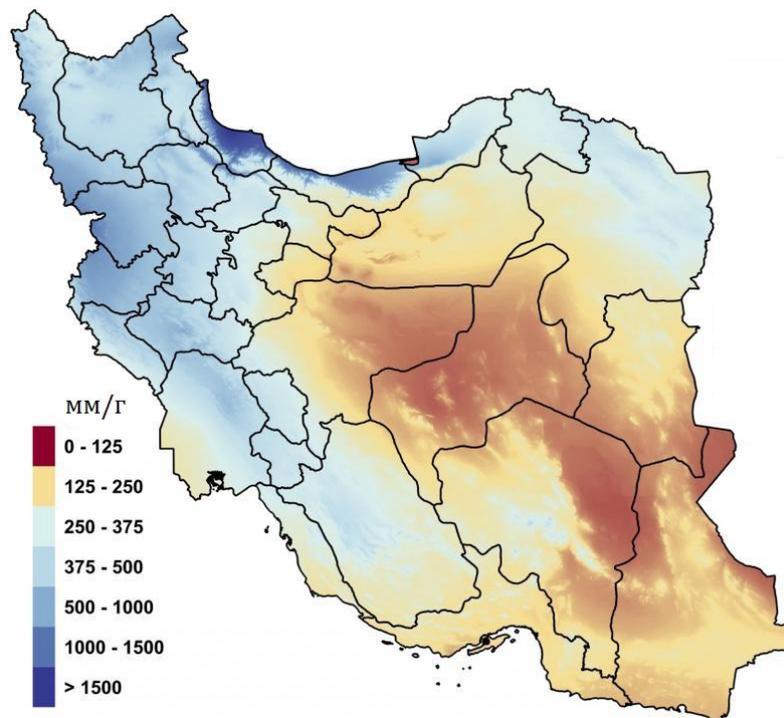


Рисунок 1.3. Распределение среднегодовых осадков в Иране

Вторым по величине источником пресной воды в Иране являются реки и озера. Река

Карун берет начало в Загросе и протекает, главным образом, по территории Хузестана на юго-западе страны. Крупнейшее в Иране озеро Урмия расположено на его северо-западе. Другая крупная река Ирана, текущая с территории Турции – Аракс, имеет притоки на территории Армении и Азербайджана до ее попадания на территорию Ирана. Общая протяженность этой реки — 950 км. Другие значимые водные ресурсы – это реки Кархе, Дез и Заянде. Большое количество мелких коротких рек имеется на севере Ирана. Все они стекают с Эльбруса и впадают в Каспийское (Хазарское) море. Реки в центральном Иране полноводны лишь в короткий период таяния снегов в горах, но большую часть года они пересыхают. В южной части Ирана зимой выпадают главным образом жидкие осадки (как правило в виде сильных ливней) ~ 6-30 дней в году.

В целях хранения пресных вод в Иране построено несколько плотин и водохранилищ. Ресурсы подземных вод используются в сельском хозяйстве, однако в некоторых частях страны ситуация с подземными водами является критической – их мало, что негативно влияет на состояние сельского хозяйства в этих регионах. Причины нехватки пресной воды в Иране можно перечислить следующим образом:

- влияние климата,
- деятельность человека,
- загрязнение пресноводных экосистем,
- урбанизация и изменения в землепользовании,
- недостатки в управления водными ресурсами.

1.2. Методы опреснения морской воды, которые могут быть использованы при крупнотоннажном производстве пресной воды в Иране

На данный момент в мире известны и применяются несколько технологий для опреснения морской воды. В большинстве своем они характеризуются высоким уровнем энергопотребления (различных видов энергии) и высокими капитальными и эксплуатационными затратами. Использование каждой технологии связано с качеством и количеством получаемой пресной воды, количеством потребления энергии, эффективностью процесса и себестоимостью продукции. Исходя из требований по условиям реализации опреснительного процесса и требований к получаемому конечному продукту, при проектировании опреснительной системы необходимо подобрать наиболее

подходящую технологию опреснения. В нашей работе рассматривается крупнотоннажное опреснение морской воды (крупнотоннажным обычно считается опреснение на уровне более 10000 м³/сут). Самые популярные используемые в мире технологии опреснения представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Технологии и процессы опреснения морской воды

Источник энергии	Технология	Процесс
Электрический	Обратный осмос (RO)	Ионная фильтрация
	Электродиализ (ED)	Ионная миграция
Тепловой + Электрический	Многоступенчатое мгновенное вскипание (MSF)	Испарение
	Многоколонная дистилляция (MED)	
	Термическая компрессия пара (TVC)	
	Мембранная дистилляция (MD)	Испарение и Фильтрование
	Замораживание	Кристаллизация
	Гидратообразование	
Химический	Ионный обмен (IX)	Физико-химические процессы на молекулярном уровне
	Экстракция	

За период с 2000 по 2015 годы совокупная производительность ОУ в мире увеличилась примерно на 60 миллионов кубометров в сут. Наибольшее распространение в настоящее время получили технологии обратного осмоса и мгновенного вскипания как наиболее коммерчески привлекательные. Методы опреснения MSF, MED, TVC и RO в

принципе вполне подходят для производства пресной воды большой и средней мощности. Так называемые гибридные системы опреснения сочетают тепловые и мембранные процессы опреснения. Их сочетания («coupling») с системой производства электроэнергии в настоящее время рассматриваются во многих странах в качестве перспективной в экономическом отношении альтернативы. На рисунке 1.4 показана современная структура производства в мире пресной воды из соленых вод по типу используемых технологий.

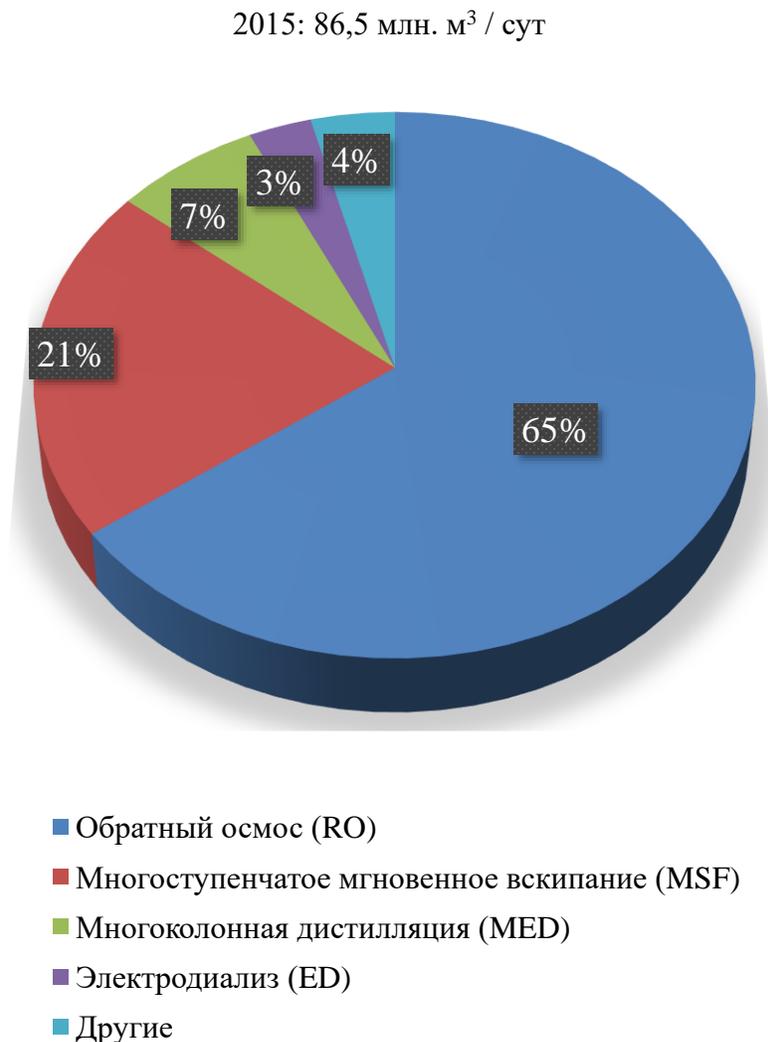
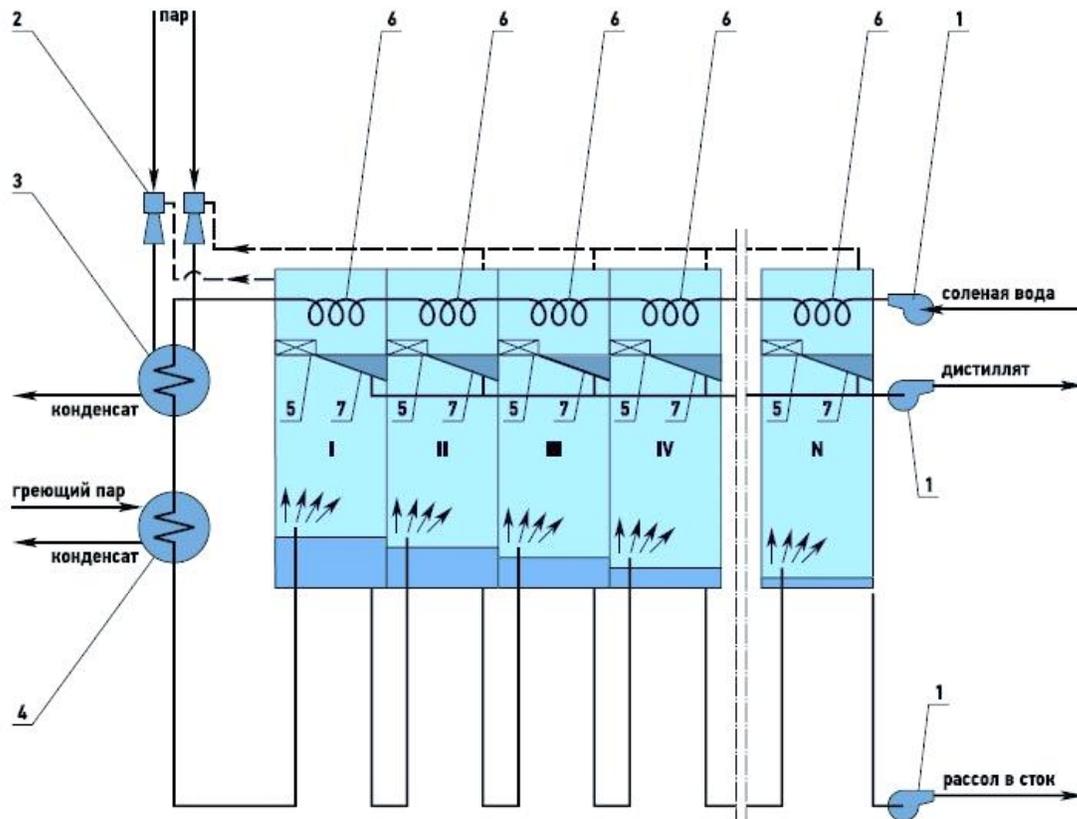


Рисунок 1.4. Структура производства пресной воды по типу используемых технологий

1.2.1. Термические методы опреснения

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 работают за счет адиабатного многоступенчатого испарения или мгновенного вскипания. Метод мгновенного вскипания (Multi Stage Flash - MSF) - наиболее часто встречающаяся технология термического обессоливания морской воды. Мгновенное вскипание отличается от обычного кипения при контакте воды с поверхностью нагрева, что имеет ряд преимуществ. Процесс генерирования вторичного пара происходит в свободном пространстве испарительной камеры, в которой отсутствует греющая поверхность (см. Рис. 1.5). Это исключает образование накипи и обеспечивает необходимую производительность каждой ступени из-за мгновенного вскипания поступающей воды и превращения ее в пар. Отличительными особенностями таких установок являются: простота конструктивного исполнения, значительное число ступеней (до нескольких десятков), прямоточный поток опресняемой воды, высокая степень ее обессоливания на выходе. Все это позволяет достигать в одном агрегате высокой производительности по пресной воде.

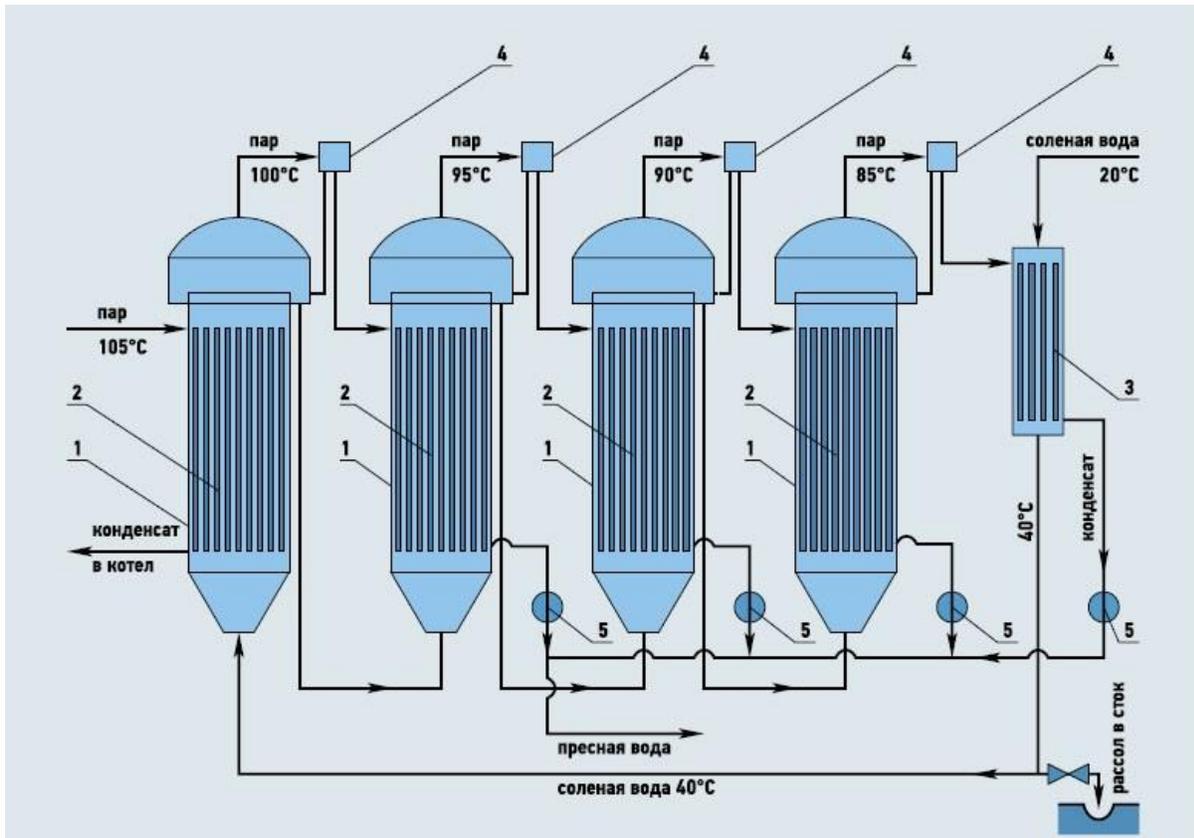


(I, II, III, IV и N — камеры испарения; 1 — насос; 2 — паровой эжектор; 3 — конденсатор эжектора; 4 — подогреватель; 5 — брызгоулавливатель; 6 — конденсатор; 7 — поддон для конденсата).

Рисунок 1.5. Схема многоступенчатого дистилляционного опреснителя с мгновенным вскипанием

В современных многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания генерация пара происходит при адиабатном вскипании воды в свободном объеме при низких температурах на уровне от 40 до 110 °С. Морская вода проходит последовательно, от последней ступени - к первой через конденсаторы, встроенные в испарительные камеры с понижающимся давлением и, нагреваясь за счет тепла конденсации, 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, поэтому процесс продолжается по всей длине аппарата. Число камер в установке достигает сорока и более.

Многоступенчатое испарение (Multi-Effect Distillation - MED) - самая старая из существующих ныне технологий обессоливания. Современные представители данной технологии - опреснительные установки тонкопленочного типа - имеют трубчатые нагревательные элементы - тонкопленочные вертикально- и горизонтально-трубные испарители. Испарение происходит в серии камер с прогрессирующим понижением давления и температуры. Внутри каждой камеры опресняемая вода впрыскивается на поверхность пучка теплообменных труб, а греющий пар проходит внутри этих труб и конденсируется (см. Рис. 1.6). На внешней поверхности трубок тонкая пленка морской воды абсорбирует тепло пара и закипает или испаряется. Нагрев и испарение воды в первой ступени установки MED 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 пара для улавливания захваченных капель морской воды. Процесс повторяется по всей длине установки.



(1 — испарительные камеры 1-й, 2-й, 3-й и 4-й ступеней; 2 — трубчатые нагревательные элементы; 3 — конечный конденсатор; 4 — брызгоулавливатель; 5 — насос).

Рисунок 1.6. Схема многоступенчатого дистилляционного опреснителя установки MED

1.2.2. Мембранные процессы опреснения

Среди мембранных технологий преобладает метод опреснения воды, известный как «обратный осмос» (RO – reversed osmosis). При опреснении воды этим методом морскую воду пропускают («продавливают») через полупроницаемые мембраны под воздействием давления, существенно превышающего разницу осмотических давлений пресной и морской воды. Преимущества технологии обратного осмоса заключаются в относительно низких энергозатратах, простоте конструкций аппаратов и установок, малых их габаритах и простоте эксплуатации; она применяется для обессоливания вод с солесодержанием до 50 г/л, причем границы ее использования год от года расширяются за счет усовершенствования конструкции мембран. На рисунке 1.7 показана конструкция мембранного элемента (модуля) установки RO.

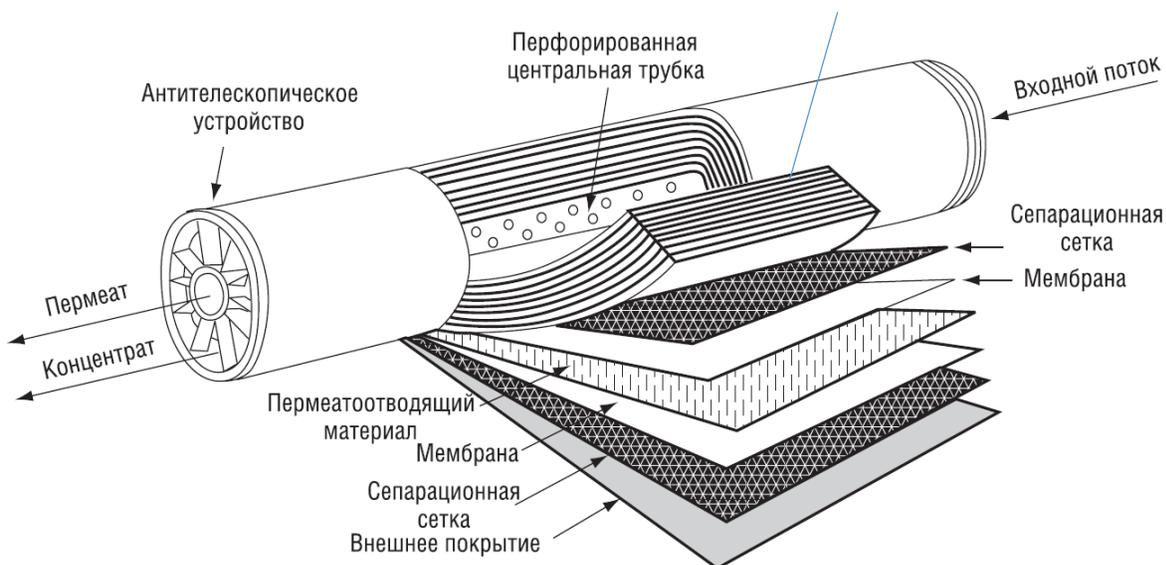


Рисунок 1.7. Конструкция элемента (модуля) обратного осмоса

Современные промышленные установки обратного осмоса включают входные фильтры тонкой очистки морской воды, системы реагентной подготовки этой воды, насосы высокого давления, блоки фильтрующих мембранных модулей, блок химической промывки мембран. В установках по опреснению воды методом обратного осмоса внутренние трубки модулей изготавливают из пористого материала и выкладывают с внутренней стороны пленкой (обычно из ацетата целлюлозы), выполняющей функции полупроницаемой мембраны. ОУ состоит из множества аналогичных труб, установленных параллельно друг другу, через которые насосом высокого давления (50-100 бар) непрерывно прокачивается морская вода. Из этих труб отводятся два потока - обессоленная вода (пермеат), и вода с концентрированными солями (концентрат), которая сливается в сток. Поток (расход) опресняемой воды через мембрану пропорционален приложенному внешнему давлению. Максимальная требуемая величина этого давления зависит от гидравлических характеристик (проницаемости) обратноосмотической мембраны. При слишком высоком давлении мембрана может разорваться, она может также забиться присутствующими в воде примесями или начать пропускать слишком большое количество растворенных солей. При слишком низком давлении процесс опреснения замедляется из-за уменьшения расхода воды.

ГЛАВА 2. Возможные типы интеграции ЯЭУ с ОУ для производства энергии и опреснения морской воды (специализированный многоцелевой атомный энерготехнологический комплекс – МАК)

2.1. Подходящие ядерные реакторы как источники энергии для опреснения морской воды

Ядерная энергетическая установка поставляет энергию в опреснительные системы в виде теплоты или электрической энергии. Она поставляет теплоту (в виде пара) для процессов дистилляции, таких как MSF или MED, и обеспечивает подачу электрической энергии для процессов, основанных на использовании этой энергии. Помимо энергии для опреснения, все процессы опреснения требуют электричество для перекачки сред и других вспомогательных действий.

Опреснительные установки могут быть одноцелевыми или установками когенерации электричества и пресной воды. В случае специализированной ОУ ядерная энергия используется исключительно для процесса опреснения, а обессоленная вода является единственным продуктом установки. В этом случае ядерный реактор полностью предназначен для подачи энергии на ОУ. В случае когенерационной установки только часть энергии используется для опреснения. Когенерационная установка производит одновременно электричество и пресную воду. В настоящей главе представлено описание схем установок, объединяющих ядерную и опреснительную технологию.

Энергетические ядерные реакторы всех типов в принципе подходят для использования в процессах опреснения. Электропитание на ОУ подается от турбоэлектродвигателя ЯЭУ или от электрической сети для привода насоса высокого давления системы обратного осмоса и главного компрессора системы MVC, для привода насосов, перекачивающих среды ОУ и для привода арматуры. Пар может быть отобран из оборудования второго контура ЯЭУ и затем использован ОУ. Защитные барьеры должны быть использованы для того, чтобы предотвратить потенциальное попадание радиоактивности в опреснительную часть установки. Конденсатор электростанции ядерно-опреснительного комплекса расположен на берегу моря, забирает охлаждающую воду из моря и сбрасывает отработанную охлаждающую воду в море. На двухцелевой установке можно использовать эту нагретую морскую воду в качестве питательной воды для ОУ

обратного осмоса, тем самым повышая производительность ОУ. Следовательно, отработанная теплота энергетической части установки может быть использована для повышения эффективности установки РО.

Ядерные энергетические реакторы можно классифицировать по виду теплоносителя:

- Первая группа — это реакторы с водяным охлаждением; большинство действующих энергетических реакторов в мире являются водоохлаждаемыми реакторами. Реакторы с водяным охлаждением представляют собой либо легководяные реакторы с охлаждением не кипящей легкой водой (LWR) как под давлением (PWR), так и бассейнового типа, а также реакторы, охлаждающиеся кипящей водой (BWR), либо реакторы с охлаждением тяжелой водой (PHWR). В реакторах с легкой водой под давлением и в кипящих реакторах в качестве топлива используется обогащенный уран, а в реакторах с тяжелой водой под давлением в качестве топлива используется природный уран.
- Вторая группа — это реакторы с газовым охлаждением. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (в настоящее время они находятся в стадии опытных разработок) используют гелий в качестве теплоносителя и графит в качестве замедлителя. Для обеспечения способности удерживать продукты деления ядер топлива при температурах порядка 1600 °С (или даже более) используется керамическая оболочка тепловыделяющих элементов.
- Третья группа — это реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (LMFR). Большая часть разработок LMFR в мире в настоящее время в России, Китае и Японии сосредоточена на создании установок, которые будут производить электроэнергию и вторичное (плутониевое) топливо. LMFR БН-350 в г. Актау в Казахстане был в свое время единственным LMFR, который использовался для опреснения морской воды.

В ЯЭУ, которые вырабатывают теплоту и электроэнергию, пар может быть отобран из подходящих мест пароводяной части станции для использования в ОУ. Величина температуры, при которой отбирается пар, имеет большое значение при выборе подходящей технологии опреснения и определения характеристик рекомендуемых

материалов и конструкций оборудования ОУ. Подходящий (обычно используемый) температурный диапазон для опреснения составляет 65–120 °С при использовании тепловых процессов MSF и MED. В таблице 2.1 представлены параметры пара ЯЭУ с различными типами ядерных реакторов.

Таблица 2.1. Типичные значения параметров пара ЯЭУ с различными ядерными реакторами

Тип реактора	Параметры пара	
	Давление (МПа)	Температура (°С)
Тяжеловодный реактор	4	250
Реактор с водой под давлением (с парогенератором, действующий по схеме многократной естественной циркуляции)	6,5	280
Реактор с водой под давлением (с прямоточным парогенератором)	6,9	312
Кипящий реактор	5,5	270
Реактор-размножитель на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением	16,3	510
Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор	17,3	540

Существуют два типа когенерации в опреснительных комплексах:

- параллельная когенерация,
- последовательная когенерация.

При параллельной когенерации электричество и пресная вода производятся путем использования части расхода пара для производства электроэнергии в турбогенераторе и использования части расхода пара в ОУ. Использование этой конфигурации позволяет увеличить степень гибкости использования энергии. Однако общее потребление энергии будет таким же, как если бы пар для опреснения воды и электричество производились в отдельности.

При последовательной когенерации электричество производится путем расширения пара сначала в турбине с повышенным противодавлением, а затем пар противодавления

используется в процессе опреснения. При этой форме когенерации потребляется более низкое общее количество энергии по сравнению с параллельной когенерацией. Из рассмотрения термодинамических соображений следует, что полезно преобразовать большую часть энтальпии пара в механическую (затем в электрическую) в турбогенераторе, прежде чем использовать этот пар в качестве теплоносителя установки термического опреснения. Повышение противодавления в турбине приводит к увеличению теплосодержания пара, поступающего в ОУ, но уменьшает количество вырабатываемой электроэнергии. Следовательно, при последовательной когенерации величина противодавления турбины должна быть оптимизирована с целью получения максимальной эффективности установки.

Причина преобладания водо-водяных реакторов в составе проектируемых ядерно-опреснительных комплексов очевидна – этот тип реактора освоен в эксплуатации во многих странах и показал высокий уровень безопасности и надежности. Реакторы этого типа по своим характеристикам (уровням мощностей, параметрам производимого во втором контуре пара) вполне подходят для использования в составе когенерационных систем. Мировой опыт создания усовершенствованных типов ядерных реакторов (например, реакторов с газовым охлаждением) намного меньше, чем опыт создания и эксплуатации реакторов с водяным охлаждением. Тем не менее важно проводить исследования максимально безопасных и максимально эффективных технологий ядерного опреснения с использованием различных типов ядерных реакторов.

2.2. Прошлый опыт и современные разработки когенерационных установок ядерного опреснения

В настоящее время в мире несколько когенерационных установок уже используется и еще больше планируется для использования. Характеристики ЯЭУ этих установок приведены в таблице 2.2. В этой таблице ядерные реакторы подразделены на существующие, строящиеся и планируемые (исследуемые). Можно отметить, что характеристики этих реакторов сильно различаются между собой, что соответствует тому обстоятельству, что технологии опреснения воды в установках с этими реакторами специфичны поскольку преследуют цель достижения максимальной эффективности производства энергии и воды. Заметим, что когенерационные системы могут также

использоваться и для других целей, таких как: производство водорода, производство стекла и цемента, в нефтехимической промышленности, в системах централизованного теплоснабжения, в целлюлозно-бумажном производстве и в других отраслях.

Таблица 2.2. Технические характеристики ядерных энергетических установок, подходящих для когенерации

Тип реактора	Спектр нейтронов	Топливо	Охлаждающая среда (теплоноситель)	Температура теплоносителя на выходе °C	Типичная электрическая мощность ЯЭУ, МВт
Существующие реакторы					
Легководяной реактор	Тепловой	UO ₂ (обогащенное) MOX (UO ₂ + PuO ₂)	H ₂ O	280–325	600–1500
Тяжеловодный реактор	Тепловой	UO ₂ (природное)	D ₂ O	310–319	700–1100
Строящиеся ЯЭУ					
Малый модульный реактор	Тепловой	UO ₂ MOX	H ₂ O	280–325	<300
Реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением	Быстрый	MOX U-Pu	Na Pb Pb-Bi	500–800	20–1100
Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор	Тепловой	UO ₂ Th/U PuO ₂ MOX U-TRU ¹	He	750–950	50–300
Планируемые ЯЭУ					
Водоохлаждаемый реактор на сверхкритических параметрах	Тепловой - Быстрый	UO ₂ Th/U MOX	H ₂ O	430–625	700–1150

¹ Трансурановый элемент (trans-uranium element)

Газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах	Быстрый	MOX U-TRU	He	850	280–1100
Реактор на расплавах солей	Тепловой	UO ₂ Th/U	Li ₂ BeF ₄ NaF-ZrF ₄	750–1000	400–1200

Ряд установок опреснения воды совмещены с легководными реакторами в Японии, США и в других странах. В Японии энергия ЯЭУ используются в ОУ технологий MED, MSF и RO с производительностью 1000–3000 м³/сут в целях получения подпиточной воды ЯЭУ и покрытия потребности в технической пресной воде на площадке ЯЭУ. ЯЭУ Мадрас в г. Калпаккам (Индия), строительство которой было завершено в 2008 году, интегрирована с ОУ производительностью 6300 м³/сут. В ней использован гибридный процесс опреснения воды MSF+RO. Установка MSF производит 4500 м³/сут пресной воды с общим содержанием растворенных твердых частиц (TDS) 25 мили г/л при солесодержании морской воды 35 г/л. Удельная производительность этой установки составляет около 1500 м³/сут на МВт_(эл) для технологии MSF и 1800 м³/сут на МВт_(эл) для установки обратного осмоса.

2.2.1. Интеграция ЯЭУ и ОУ, действующей по технологии обратного осмоса (RO)

Сочетание ядерного реактора с ОУ, действующей по технологии обратного осмоса, можно считать более простым процессом по сравнению с сочетаниями термического опреснения с ЯЭУ. При интеграции ОУ RO с ЯЭУ целесообразно использовать следующие технологические приемы, повышающие общую эффективность установки:

- подогревать питательную воду: производительность мембран RO при более высоких температурах выше, чем при более низких; при более высоких температурах достигается экономия затрат; для подогрева питательной воды можно использовать отработанную теплоту энергоустановки;
- проводить опреснение при повышенном давлении питательной воды; осуществление процесса при повышенном давлении повышает эффективность мембран системы RO; многие разработчики систем обратного осмоса предпочитают использовать более низкие давления в целях экономии затрат энергии на прокачку воды, однако, проведение процесса при более высоких давлениях приводит к значительному увеличению производительности установки - поэтому следует

проводить оптимизацию, рассматривая цены опресненной воды и затраты на электроэнергию;

- использовать ультрафильтрацию (УФ) в качестве метода предварительной обработки воды; использование УФ-мембран минимизирует требование к предварительной обработке воды и, таким образом, значительно снижается стоимость производства воды - одновременно уменьшаются экологические проблемы; вторым важным преимуществом использования УФ является увеличение производительности мембран RO, которые в этом случае действуют на относительно чистой питательной воде.
- Использовать восстановление энергии; системы восстановления энергии используются в технологии RO, чтобы утилизировать энергию, которая иначе была бы потеряна; в последние годы был достигнут значительный прогресс в создании систем восстановления энергии; ожидается, что прогресс в этой области будет продолжать снижать стоимость и повышать эффективность опреснительных систем.

При использовании процесса обратного осмоса электричество питает насосы, которые создают давление воды и проталкивают ее через мембрану против ее осмотического давления, которое составляет примерно 27 бар. На рисунке 2.1 показано сочетание реактора с водой под давлением и ОУ RO. Недостатком этого процесса является относительно низкое качество получаемой воды, что приводит к необходимости дополнительной обработки опресненной воды с целью доведения ее качества до питьевого уровня.

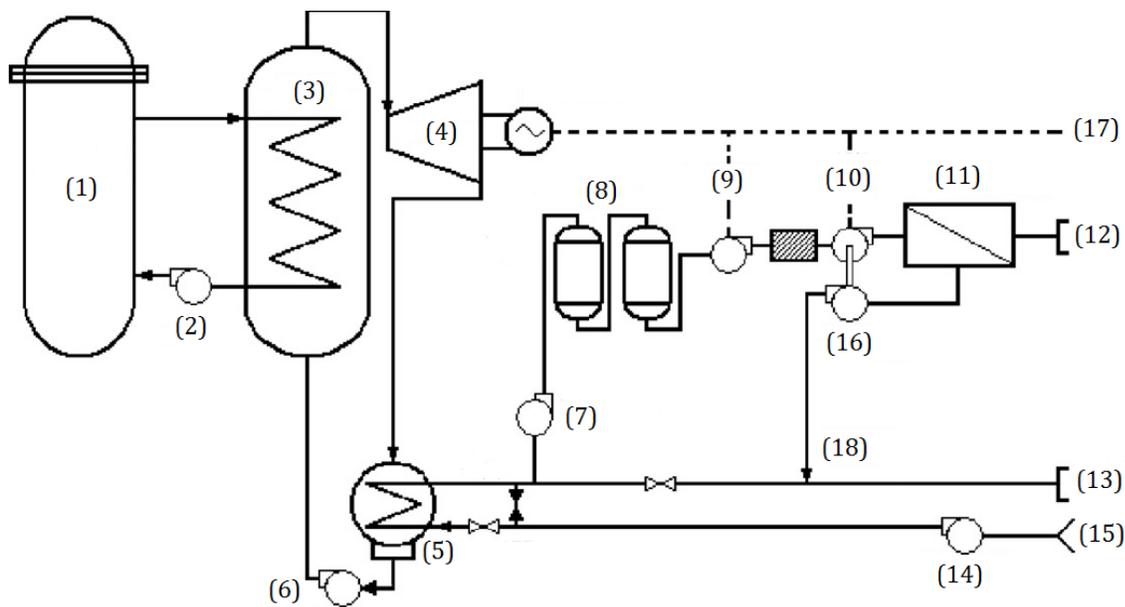


Рисунок 2.1. Схема интеграции ядерного реактора с водой под давлением с технологией опреснения RO:

- 1) Ядерный реактор; 2) Главный циркуляционный насос; 3) Парогенератор; 4) Турбина; 5) Конденсатор; 6) Питательный насос; 7) Насос системы опреснения; 8) Предварительная обработка воды; 9,10) Насос высокого давления; 11) Мембраны RO; 12) Пресная вода; 13) Водоотвод; 14) Насос подачи морской воды; 15) Водозабор; 16) Система восстановления энергии; 17) Электричество в сеть; 18) Сброс рассола.

2.2.2. Интеграция ЯЭУ с ОУ, действующей по технологии многоступенчатого мгновенного вскипания (MSF)

В случае интеграции ядерного реактора с термической ОУ соединение по своему существу является очень «прочным» - в том смысле, что любые переходные процессы в реакторе или в ОУ могут оказать существенное влияние на работу обеих установок. Поэтому задача обеспечения надежности всего комплекса состоит в том, чтобы показать, что выбор проектных решений таков, что когенерационная установка останется в работоспособном состоянии при любых возможных переходных процессах.

Дистилляционные установки типа MSF, особенно крупные, обычно соединяются с электростанциями. При этом отработанная теплота электростанции используется для нагрева морской воды. Это уменьшает затраты энергии (от половины до двух третей). На

рисунке 2.2 показана схема сочетания реактора с ОУ MSF.

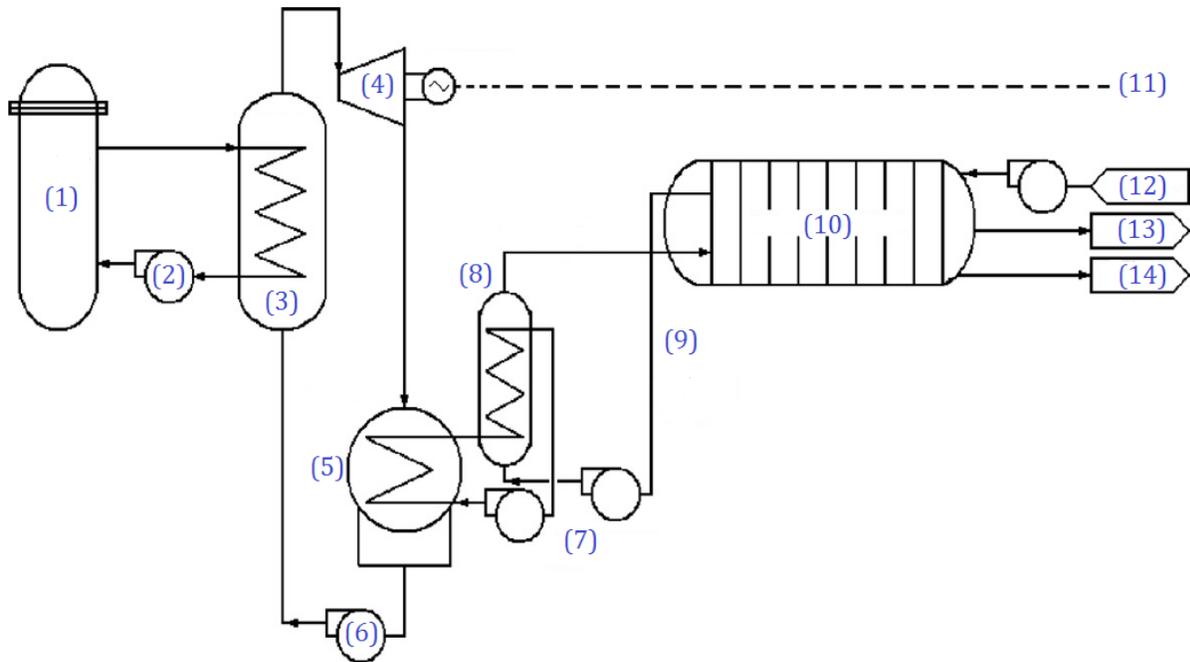


Рисунок 2.2. Интеграция ЯЭУ с реактором с водой под давлением с ОУ технологии MSF

- 1) Ядерный реактор; 2) Главный циркуляционный насос; 3) Парогенератор; 4) Турбина; 5) Конденсатор; 6) Питательный насос; 7) Промежуточный рециркуляционный насос; 8) Промежуточный теплообменник; 9) Подогретая морская вода; 10) Аппарат многоступенчатого мгновенного вскипания; 11) Электричество в сеть; 12) Водозабор; 13) Пресная вода; 14) Сброс рассола

2.2.3. Интеграция ЯЭУ с ОУ, действующей по технологии многоколонной дистилляции (MED)

Технология опреснения MED относится к классу термических технологий. При опреснении воды методом MED первая (самая «теплая») ступень обычно работает при температуре ниже 70 °С, чтобы избежать образования накипи. В случае реализации технологии MED интеграция ЯЭУ и ОУ целесообразна в высшей степени, поскольку использование отработанной теплоты ЯЭУ в ОУ не требует дополнительных затрат энергии. На рисунке 2.3 показана типичная схема сочетания технологии MED с реактором с водой под давлением. Нагретая в конденсаторе турбины вода (или теплота отборного пара

производстве кубометра воды, соответственно.

ГЛАВА 3. Техничко-экономические характеристики ядерно-опреснительного комплекса

3.1. Цели и методика термозкономического моделирования ядерно-опреснительного комплекса

Основная задача технико-экономической оценки любого инженерного проекта заключается в том, чтобы дать возможность проектировщику, производителю, поставщику и пользователю создаваемого объекта сравнить его альтернативные варианты, обеспечить оптимальное финансирование реализации проекта, установить тарифы на получаемую продукцию и разработать подходящие схемы и оборудование этого объекта. Полученные при моделировании экономические и технические характеристики объекта могут быть использованы при моделировании действий, необходимых для привлечения потенциальных инвесторов и кредиторов проекта. Рассматривая ядерное опреснение, можно сказать, что существует несколько факторов, которые оказывают влияние на реальную стоимость опресненной воды; они должны учитываться при создании ядерно-опреснительного комплекса. Эти факторы включают характеристики площадки, на которой сооружается комплекс, величину требуемой производительности установки по пресной воде, требуемое качество питательной воды, стоимость производимой ЯЭУ электроэнергии, выбранную технологию опреснения, величину процентной ставки и стоимость оборудования комплекса. Основная цель и содержание данного раздела нашей работы – разработка и использование надежного метода определения технико-экономических характеристик, определение цены на опресненную воду при использовании рассматриваемой схемы сочетания ядерной и опреснительной частей комплекса.

3.2.1. Метод моделирования термического опреснения (MED и MSF)

Использование этого метода необходимо для того, чтобы получить величину производительности ОУ MED или MSF при данной величине потребляемой энергии. Он используется для расчета производительности по воде в заданном температурном интервале. Методология расчета основана на эмпирических данных о коэффициенте

выхода продукта (GOR^2) в зависимости от количества ступеней опреснения. Используемый при этом нами метод расчета описан в работах.

Температура опресняемой воды в последней ступени установки MED или MSF вычисляется по следующей формуле:

$$T_{ls} = T_{cr} + T_{cw} \quad (3.1)$$

где,

T_{cr} ($^{\circ}C$): диапазон падения температуры в конденсаторе дистилляционной установки,

T_{cw} ($^{\circ}C$): температура охлаждающей воды в конденсаторе дистилляционной установки.

Средняя рабочая температура дистиллята может быть определена как разница между температурами рассола первой и последней ступени дистилляции. Ее можно рассчитать по следующей формуле:

$$T_{op} = T_{mb} - T_{ls} \quad (3.2)$$

где,

T_{mb} ($^{\circ}C$): максимальная температура рассола (температура рассола первой ступени).

Общее количество ступеней ОУ MED влияет на величину GOR дистилляционной системы. Полуэмпирическое уравнение, которое используется обычно для расчета количества ступеней установки MED имеет вид:

$$N_{MED} = Integer\left(\frac{T_{op}}{T_{ad}}\right) \quad (3.3)$$

где,

Integer: целая часть дроби,

T_{ad} ($^{\circ}C$): средняя величина перепада температуры между ступенями.

Так же, как для технологии MED, количество ступеней установки для технологии MSF можно получить по той же формуле, что и (3.3), т. е.:

$$N_{MSF} = Integer\left(\frac{T_{op}}{T_{ad}}\right) \quad (3.4)$$

На установке MSF греющий пар нагревает трубы с соленой водой в камере - нагревателе рассола. Величина повышенной температуры после рассольного нагревателя рассчитывается по следующей формуле:

²Gain Output Ratio: коэффициент выхода продукта (на 1 тонну греющего пара)

$$T_{bhr} = T_{op} \frac{N_{rmsf}}{N_{MSF} + N_{rmsf}} \quad (3.5)$$

где,

N_{rmsf} : количество ступеней отвода рассола в установке MSF.

GOR для установки MED может быть рассчитан по эмпирической формуле:

$$GOR = 0.8 N_{MED}. \quad (3.6)$$

Для ОУ технологии MSF величина GOR зависит от большего количества параметров по сравнению с установкой MED, а именно:

$$GOR = \frac{\Delta H(T_{con})}{h_{bmsf}(T_{bhr} + \Delta T_{be})} \left[1 - \exp\left(\frac{C_{bmsf} T_{op}}{\Delta H\left(\frac{T_{mb} + T_{ls}}{2}\right)}\right) \right] \quad (3.7)$$

где,

T_{con} (°C): температура конденсации

ΔH (кДж / кг): скрытая теплота парообразования при данной температуре

h_{bmsf} (кДж / кг К): удельная теплоемкость воды в рассольном нагревателе установки MSF

ΔT_{be} (°C): среднее изменение температуры кипения между двумя ступенями

C_{bmsf} (кДж / кг К): средняя удельная теплоемкость рассола.

Используя следующие эмпирические формулы, можно рассчитать удельное энергопотребление дистилляционной установки (кВт / м³). Для установки MED:

$$Q_{swp} = 2.5 + 0.1 \cdot (GOR - 10) \quad (3.8)$$

Для установки MSF:

$$Q_{swp} = 3.2 + 0.2 \cdot (GOR - 8) \quad (3.9)$$

Общая потребляемая электрическая мощность (в мегаваттах), используемая дистилляционной установкой, может быть определена с помощью зависимости:

$$Q_{dist} = \frac{W_d}{24 \cdot 1000} Q_{swp} \quad (3.10)$$

где,

W_d (м³ / сут): производительность ОУ.

Общая величина мощности (МВт), необходимая для опреснения, рассчитывается по формуле:

$$Q_{th} = \frac{W_d}{GOR \cdot 24 \cdot 3600} \cdot \Delta H(T_{con}) \quad (3.11)$$

Расход рассола может быть оценен с помощью величины коэффициента концентрирования (CF)³. Он представляет собой отношение общего количества растворенных твердых веществ в рассоле к общему количеству растворенных твердых веществ в питательной воде. С учетом этого коэффициента расход рассола равен:

$$W_b = W_d \cdot (CF - 1) \quad (3.12)$$

Количество питательной воды рассчитывается по формуле:

$$W_{fw} = W_d \cdot CF \quad (3.13)$$

Учитывая коэффициент концентрирования и используя уравнения массового расхода и солевого баланса, количество опресненной воды можно определить как:

$$W_p = W_{fw} \cdot \left(1 - \frac{1}{CF}\right) \quad (3.14)$$

Эта формула показывает, что при данном расходе морской воды чем выше соленость рассола, тем больше опресненной воды может быть получено на кубический метр морской воды. Теоретически, при бесконечно высокой концентрации соли в рассоле расход питательной воды будет равен расходу опресненной воды.

Для систем обратного осмоса (RO) коэффициент извлечения (RR)⁴ определяется как отношение расхода опресненной воды (проницаемой воды) к расходу питательной воды. Используя это определение и применяя формулу (4.12), коэффициент концентрирования может быть найден как:

$$CF = \frac{1}{(1 - RR)} \quad (3.15)$$

В процессах термического опреснения величина коэффициента концентрирования ограничена опасностью образования накипи при высоких температурах. Для соленых вод Ближнего Востока (с соленостью около 45000 промилле) коэффициент концентрирования составляет 1,4 - 1,5.

³ Concentration Factor

⁴ Recovery ratio

3.2.2. Метод моделирования обратного осмоса (RO)

Для расчета стоимости опресненной воды методом RO необходимо знать общее количество электроэнергии, которое требуется для опреснения при определенной производительности установки. Количество электричества, которое используется в процессе RO, зависит от производительности, потребляемой каждым насосом высокого давления и подачи воды, за вычетом энергии, обеспечиваемой устройством восстановления энергии. Ниже описывается расчетная модель, используемая в методе моделирования RO.

Коэффициент извлечения системы RO можно определить как:

$$RR = 1 - \frac{0.00115}{P_{max}} TDS \quad (3.16)$$

где,

P_{max} (бар): максимальное расчетное давление на входе в мембраны системы RO

TDS (млн⁻¹): общее количество растворенных твердых веществ.

Расход питательной воды, подаваемой к мембранам, определяется с помощью формулы:

$$W_{fRO} = \frac{W_d}{RR} \quad (3.17)$$

Общая соленость рассола рассчитывается по выражению:

$$TDS_b = \frac{TDS}{1 - RR} \quad (3.18)$$

Соленость воды после мембран можно определить, как:

$$TDS_{per} = 0.00125 \cdot TDS \frac{Flux_n}{Flux_d} \left(1 - \frac{1}{1 - RR} \right) [1 + 0.03(T_{iRO} - 25)] \quad (3.19)$$

где,

$Flux_n$ (л / м² ч): номинальный проницаемый удельный объемный расход через мембраны

$Flux_d$ (л / м² ч): удельный расход рабочего проницаемого потока

T_{iRO} (°C): температура питательной воды на входе в мембраны.

Среднее осмотическое давление (в барах) мембран можно оценить по следующей формуле:

$$P_{av} = 0.525 \cdot [\Pi(TDS, T_{iRO}) + \Pi(TDS_b, T_{iRO})] \quad (3.20)$$

где,

Π (бар): функция осмотического давления, представляется следующим выражением:

$$\Pi(X, Y) = 0.0000348 \cdot (Y + 273) X / 14.7 \quad (3.21)$$

Расчетный движущий напор может быть найден по следующей формуле:

$$P_{net} = \frac{Flux_d}{Flux_n \cdot A} \cdot P_{nom} \cdot \frac{B}{FF} \quad (3.22)$$

где,

P_{nom} (бар): номинальный движущий напор

FF : фактор, учитывающий отложения на мембранах⁵

A и B - поправочные коэффициенты на соленость и температуру, соответственно, они могут быть определены с помощью следующих зависимостей:

$$A = 1.5 - 0.0000075 \cdot \left(1 + \frac{1}{1 - RR}\right) TDS \quad (3.23)$$

$$B = EXP \left[PC \left(\frac{1}{T_{iRO} + 273} - \frac{1}{25 + 273} \right) \right] \quad (3.24)$$

где,

PC : константа проницаемости мембраны.

Повышение давления на насосе высокого напора можно определить по уравнению:

$$\Delta P_{hhp} = P_{av} + P_{net} + \frac{\Delta P_{drop}}{2} + \Delta P_{ppl} + \Delta P_{ps} \quad (3.25)$$

где,

ΔP_{drop} (бар): падение давления в системе

ΔP_{ppl} (бар): потеря давления при проникновении воды через мембраны

ΔP_{ps} (бар): перепад давления на всасе насоса.

Требуемая мощность насоса высокого напора может быть рассчитана как:

$$PP_{hh} = \frac{0.01157 W_{fRO} \cdot \Delta P_{hhp}}{e_{hhp} \cdot e_{hc} \cdot 9866} \quad (3.26)$$

где,

PP : мощность насоса,

e_{hhp} : эффективность (КПД) насоса высокого напора

e_{hc} : КПД насоса подачи питательной воды при его совместной работе с насосом высокого давления.

⁵ Fouling factor of membranes.

Мощность насоса подачи морской воды может быть рассчитана как:

$$PP_{sw} = \frac{0.01157 W_{fRO} \cdot \Delta P_{sw}}{e_{swp} \cdot e_{hc} \cdot 9866} \quad (3.27)$$

где,

ΔP_{sw} (бар): напор насоса подачи морской воды

e_{sw} : эффективность насоса подачи морской воды.

Мощность бустерного насоса определяется по формуле:

$$PP_b = \frac{0.01157 W_{fRO} \cdot \Delta P_{bp}}{e_{bp} \cdot 9866} \quad (3.28)$$

где,

ΔP_{bp} (бар): напор бустерного насоса

e_{bp} : эффективность бустерного насоса.

Другие энергопотребления можно оценить по следующей формуле:

$$PP_o = \frac{W_{fRO} \cdot P_{spo}}{24 \cdot 1000} \quad (3.29)$$

Где,

P_{spo} (кВтч / м³): другие удельные энергопотребления.

Нижеследующая формула используется для получения величины общей мощности, используемой системой RO:

$$Q_{RO} = PP_{hh} + PP_{sw} + PP_b + PP_o + E_{rec} \quad (3.30)$$

где,

E_{rec} (МВт): мощность, затрачиваемая на восстановление давления.

Удельная потребляемая электрическая энергия (кВтч/м³) определяется следующим образом:

$$q_{RO} = \frac{Q_{RO}}{W_{fRO}} \cdot 24 \cdot 1000 \quad (3.31)$$

3.2.3. Метод моделирования гибридного опреснения (RO+MED/MSF)

Оценка стоимости гибридных ОУ основана на комбинации моделей при равных расходах питательной воды в сочетаемых установках. Интеграция систем RO и систем термического опреснения приводит к уменьшению требуемого количества питательной

воды при том же количестве опресненной воды. Заметим, что эта особенность использования систем гибридного опреснения не учитывается во многих экономических исследованиях, и, в частности, в программе DEEP. В предлагаемых нами схемах гибридного опреснения оценивается экономический эффект от использования рассола одного процесса опреснения (RO) в качестве питательной воды для другого процесса опреснения (термического).

Целесообразно использовать часть охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ в качестве питательной воды систем опреснения. Такой подход приводит к значительному снижению стоимости опреснения. Температура воды на выходе конденсатора значительно выше, чем температура морской воды, что также является благоприятным фактором. Более высокая температура питательной воды на входе в мембраны приводит к лучшей проницаемости мембран. Указанные опции также включены в нашу методику и в нашу компьютерную программу, что позволяет показать в количественном отношении преимущества гибридных схем опреснения по сравнению с «одиночными» системами.

3.3. Методика экономической оценки ОУ

Использование ОУ требует финансовых затрат нескольких видов и приводит к получению дохода в течение длительного периода времени. Некоторые из видов затрат сильно зависят от особенностей страны или региона, в котором построена ОУ. Существует несколько разработанных методологий, применяемых для оценки затрат на различных этапах создания ОУ. В нашем исследовании для оценки затрат на опреснение мы использовали метод «Power credit». В этом методе стоимость энергии, потребляемой для опреснения, рассчитывается на основе стоимости энергии, вырабатываемой ЯЭУ. Используемые при этом параметры и зависимые от них факторы представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Экономические параметры ОУ

Обозначение	Параметр
C_{cap}	Капитальные расходы
C_{const}	Общая стоимость сооружения
C_{tbase}	Общая базовая стоимость

C_{intake}	Затраты на водозабор	
$C_{intloop}$	Стоимость промежуточного контура	
C_{owner}	Общая стоимость владения ⁶	
C_{cont}	Непредвиденные расходы	Фактор непредвиденного расхода
I_{dc}	Прибыль от сооружения комплекса	Время сооружения
		Процентная ставка ⁷
C_{op}	Эксплуатационные затраты	
C_{energy}	Затраты на энергию	
C_{heat}	Стоимость тепловой энергии	Снижение электрической энергии
C_{el}	Стоимость электроэнергии	Потребность в энергии
		Стоимость электроэнергии
C_{backup}	Стоимость резервной тепловой энергии ⁸	Расходы на топливо
C_{bel}	Стоимость покупной электроэнергии	Стоимость электроэнергии
$C_{o\&m}$	Расходы на эксплуатацию и обслуживание	
C_{man}	Управление	Зарплата менеджмента
C_{lab}	Труд	Заработная плата персонала
C_{mat}	Материал	Запасные части
		Замена труб (MED)
		Химические материалы для предварительной и последующей обработки
		Затраты на замены мембран (RO)

⁶ это стоимость при покупке активов и инвестировании в капитальные проекты, которые должен нести владелец с момента начала (вступления в состояние владения) до момента выхода из состояния владения.

⁷ Сумма, указанная в процентном выражении к сумме кредита, которую платит получатель кредита за пользование им в расчёте на определённый период (месяц, квартал, год). С позиции теории денег, процентная ставка — это цена денег как средства сбережения.

⁸ Резервная тепловая энергия в период, когда ЯЭУ не работает.

C_{ins}	Страхование
-----------	-------------

Для ЯЭУ, интегрированной с ОУ, величина стоимости электроэнергии (методика расчета стоимости этой электроэнергии приведена в следующем разделе) используется для расчета стоимости энергии, расходуемой ОУ. Если используется резервный источник теплоты, то стоимость резервной теплоты будет рассчитываться также. Затраты на производство воды рассчитываются путем деления требуемого годового ее расхода на сумму годового объема производства воды. Годовая стоимость состоит из ежегодных капитальных затрат, затрат на эксплуатацию и обслуживание, а также затрат на энергию, потребляемую ОУ.

Экономические расчеты для обоих типов установок термического опреснения аналогичны. При определении капитальных затрат на ОУ выполняются описанные ниже расчеты.

Общая базовая стоимость $\$/(\text{м}^3/\text{сут})$ ОУ определяется по следующей формуле:

$$C_{tbase} = C_{abase} + C_{backup} \quad (3.32)$$

Отрегулированная базовая стоимость ОУ⁹ (C_{abase}) получается по следующей формуле:

$$C_{abase} = W_d(C_{ubase} \cdot K_{size} + C_{intake} + C_{intloop}) \quad (3.33)$$

где,

C_{ubase} ($\$/\text{м}^3/\text{день}$): удельная базовая стоимость

K_{size} : поправочный коэффициент на величину производительности¹⁰ ОУ

C_{intake} : стоимость водозабора.

Удельная базовая стоимость является одним из наиболее важных параметров в экономической оценке ОУ. Этот параметр должен соответствовать средней стоимости объектов опреснения, которые уже созданы в мире. Удельные затраты на сооружение ОУ различны в разных регионах и зависят также от типа (технологии) ОУ. Например, в случае ОУ типа MSF удельная базовая стоимость составляет около $1400 \$/(\text{м}^3/\text{день})$ в Иране, что на 15-20% выше, чем в других странах региона Персидского залива. Это главным образом потому, что у Ирана гораздо меньше опыта сооружения и использования опреснительных установок, чем у этих стран.

⁹ Adjusted base cost of desalination plant.

¹⁰ Size correction factor.

Стоимость забора воды и предварительной ее обработки при использовании методов MED или MSF может быть рассчитана по следующей формуле:

$$C_{intake} = 50 (24 W_d) \quad (3.34)$$

Стоимость забора и предварительной обработки воды при использовании метода RO можно рассчитать по следующей формуле:

$$C_{intake} = 996 (24 \cdot W_d)^{0.8} \quad (3.35)$$

Расходы непредвиденные — расходы, не предусмотренные планами, программами, бюджетами, сметами, возникшие неожиданным образом. Они включают непредвиденное увеличение издержек производства и обращения, возмещение убытков, штрафы, пени, неустойки. Формула для оценки непредвиденных расходов ОУ имеет следующий вид:

$$C_{cont} = (C_{tbase} + C_{owner}) \cdot K_{cont}, \quad (3.36)$$

где,

K_{cont} : коэффициент учета непредвиденных расходов (он составляет от 8% до 12%.)

Общая стоимость сооружения ОУ может быть рассчитана по следующей формуле:

$$C_{const} = C_{tbase} + C_{owner} + C_{cont} \quad (3.37)$$

При расчете капитальных затрат также следует учитывать процент во время строительства. Для расчета величины этих затрат используется следующая формула:

$$I_{dc} = C_{const} \left[(1 + IR)^{\frac{LD}{24}} - 1 \right] \quad (3.38)$$

где,

IR (%): процентная ставка.

Нижеследующая зависимость используется для расчета годовой фиксированной стоимости ОУ¹¹:

$$C_{ann} = (C_{const} + I_{dc}) \cdot f_{cap}(DR, LT) \quad (3.39)$$

где,

DR (%): учетная ставка (discount rate) — это сумма в процентном выражении к величине денежного обязательства (векселя), которую взимает приобретатель обязательства. Фактически, учётная ставка — это цена приобретения обязательства до наступления срока уплаты. Как и процентная ставка, учётная ставка определяет величину платы за аренду

¹¹ Fixed annual cost of desalination plant.

денег. Сама плата в данном случае называется дисконтом.

LT (год): срок службы ОУ,

f_{cap} : фактор (функция) фонда возмещения¹², определяется в виде:

$$f_{cap}(i, n) = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (3.40)$$

Стоимость эксплуатации и обслуживания представляет собой сумму стоимости менеджмента, затрат на оплату труда, стоимости материалов, стоимости страхования. Учитывая эти составляющие стоимости, общие затраты на эксплуатацию и обслуживание могут быть определены с помощью следующей зависимости:

$$C_{o\&m} = C_{man} + C_{lab} + C_{mat} + C_{ins} \quad (3.41)$$

Общая годовая стоимость ОУ определяется как:

$$C_{total} = C_{ann} + C_{heat} + C_{backup} + C_{el} + C_{o\&m} \quad (3.42)$$

Стоимость производства воды (C_{water}) определяется делением общей годовой стоимости ОУ на общее годовое производство воды.

$$C_{water} = C_{total} / W_{ann} \quad (3.43)$$

где,

W_{ann} (м³/год): годовое количество опресненной воды

ГЛАВА 4. Результаты термoeкономических расчетов различных возможных для использования в Иране систем опреснения морской воды в сочетании с ядерными реакторами различной мощности

4.1. Термoeкономический анализ опреснения морской воды с использованием в составе МАК малых модульных ядерных реакторов (ММР¹³)

В этом разделе рассматриваются термодинамические аспекты и экономические характеристики типичного ММР. В спектр его возможностей входят когенерация (электроэнергия + теплота) и опреснение воды. На рисунке 4.1 показана структурная схема второго контура предполагаемого ММР. Небольшой размер и высокая степень модульности ММР облегчают осуществление сочетания ЯЭУ с ОУ. В частности,

¹² Function of capital recovery factor

¹³ SMR – Small Modular Reactor

конструкция ММР позволяет каждому модулю работать как с мембранными, так и термическими технологиями опреснения. Конфигурация сочетанной установки может быть таким образом изменена, чтобы обеспечить наиболее высшую гибкость в выборе варианта с учетом требований, специфических для данной установки.

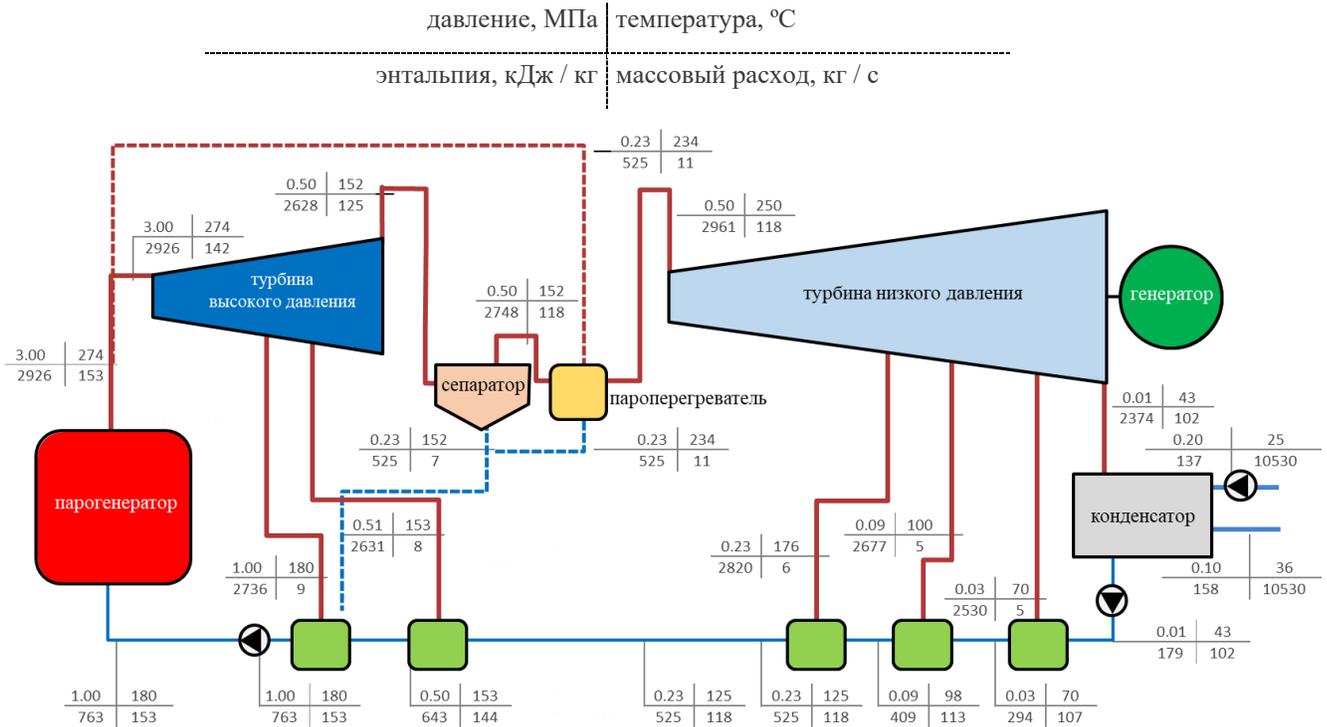


Рисунок 4.1. Тепловой баланс второго контура ЯЭУ с предполагаемым ММР

Учитывая то обстоятельство, что в случае использования ММР количество тепловой энергии, доступной для использования в ОУ, относительно невелико, следует тщательно выбрать технологии опреснения и для такого комплекса схемы их сочетания с ММР. Рассмотрим три варианта отбора пара для подачи тепловой энергии, необходимой для термических ОУ:

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

Результаты проведенного нами термодинамического анализа сочетания ММР с термической ОУ производительностью 15000 м³/сут приведены в таблице 4.1. Минимум энергии, потребляемой для опреснения, достигается при использовании варианта (с) в сочетании с технологией MED. Отбор пара после парогенератора (вариант а) приводит к

большому количеству потерь мощности, потому что температура и давление пара после парогенератора слишком высоки, и его лучше использовать для приведения в действие турбины высокого давления. Сочетание ОУ с ММР приводит к увеличению коэффициента полезного действия (КПД) когенерационного комплекса на 6,5-9,5% в рассмотренных нами вариантах.

Таблица 4.1. Результаты термодинамического анализа различных вариантов ядерно-опреснительного комплекса

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

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

4.2. Сравнение стоимостей опреснения морской воды для разных конфигураций атомного энергоопреснительного комплекса

Результаты сравнения себестоимостей опресненной воды с использованием разных схем сочетания ЯЭУ с различными технологиями опреснения (они описаны в предыдущих разделах диссертации), в зависимости от производительности ОУ представлены на

рисунках 4.2-6. Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Сочетание ММР с ОУ технологии MSF приводит к самой высокой себестоимости пресной воды среди рассмотренными нами конфигураций, потому что потребление электроэнергии и теплоты в технологии MSF выше, чем в других процессах опреснения, и себестоимость энергии, вырабатываемой ММР, выше, чем в ядерных реакторах большой мощности.
2. Наиболее выгодная в экономическом отношении конфигурация для опреснения воды среди рассмотренных нами вариантов – это использование охлаждающей воды конденсатора в качестве питательной воды ОУ. Однако, следует заметить, что помимо стоимости опреснения, существуют и другие параметры такие, например, как качество полученной пресной воды, которые также важно учитывать при выборе наиболее подходящей конфигурации ядерно-опреснительного комплекса.
3. Во всех рассмотренных вариантах использование технологии RO приводит к самым низким затратам на опреснение; при этом они несколько снижаются при увеличении производительности ОУ.

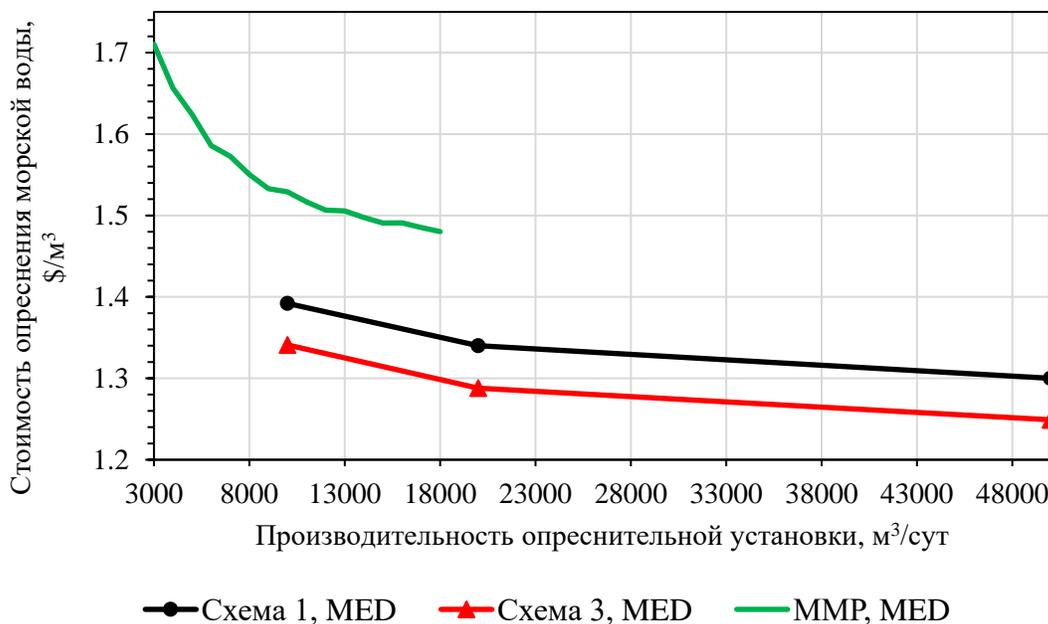


Рисунок 4.2. Стоимости получаемой пресной воды технологией MED, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

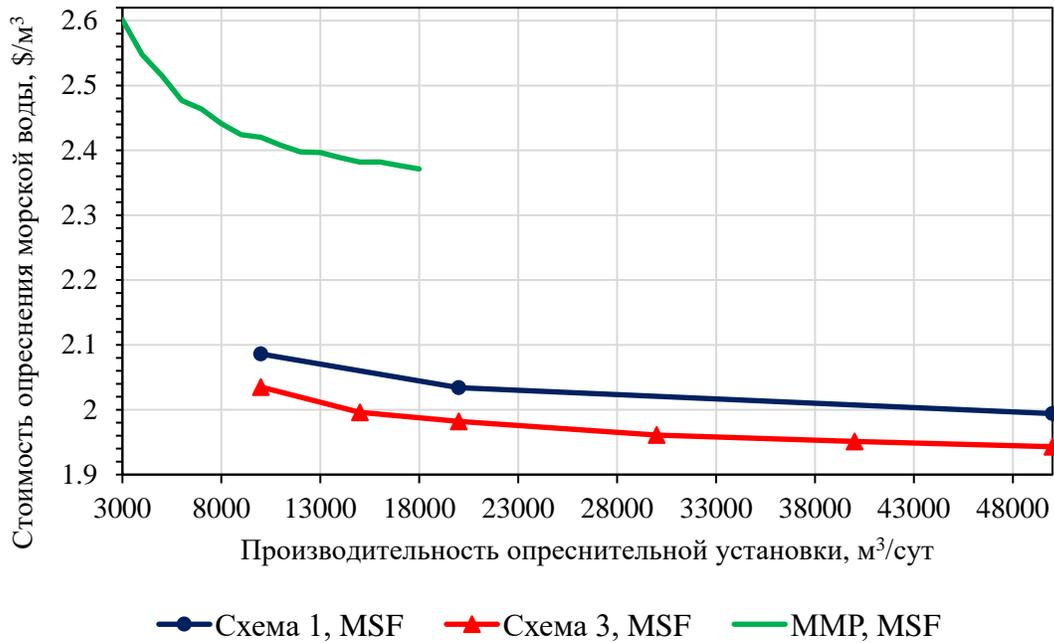


Рисунок 4.3. Стоимости получаемой пресной воды технологией MSF, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

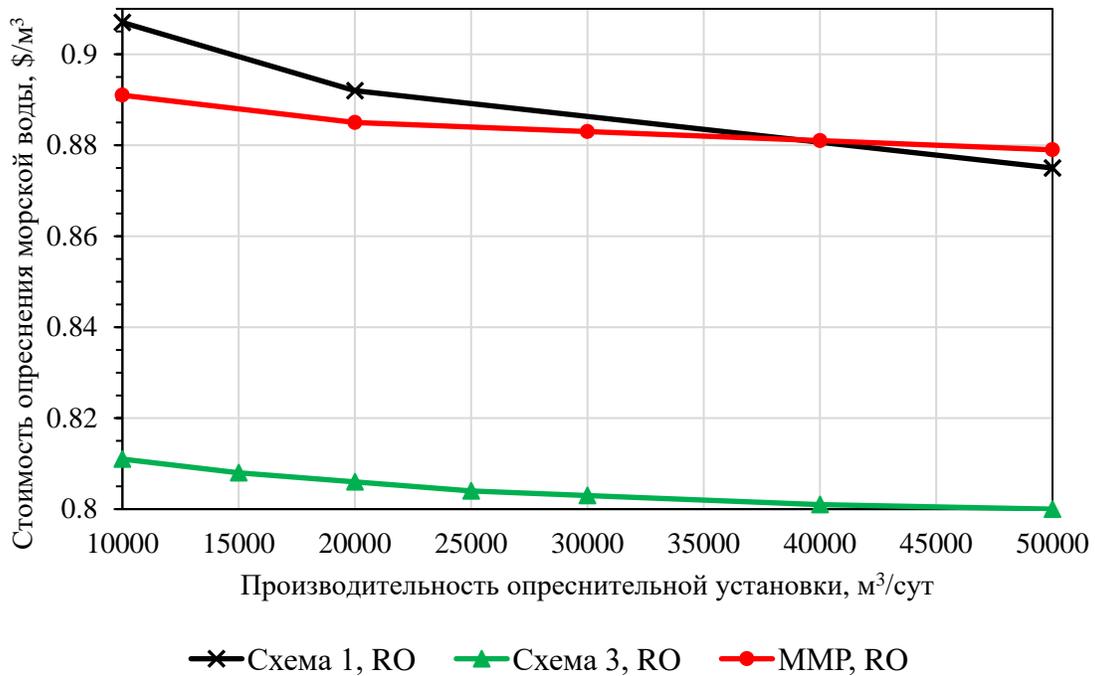


Рисунок 4.4. Стоимости получаемой пресной воды технологией RO, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

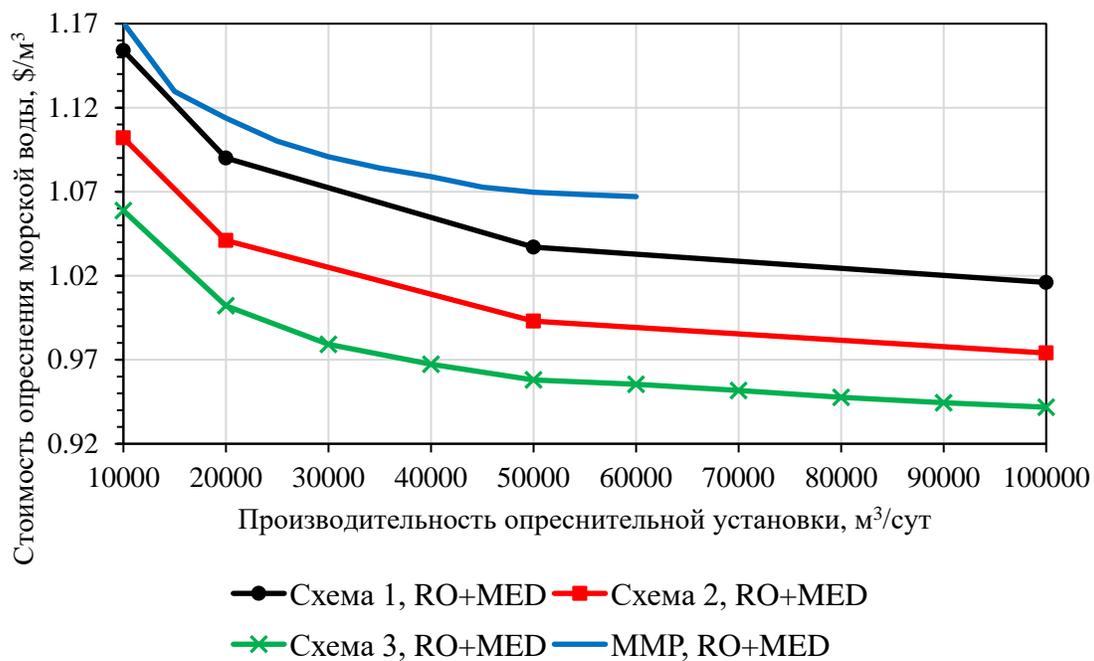


Рисунок 4.5. Стоимости получаемой пресной воды гибридной технологией RO+MED, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

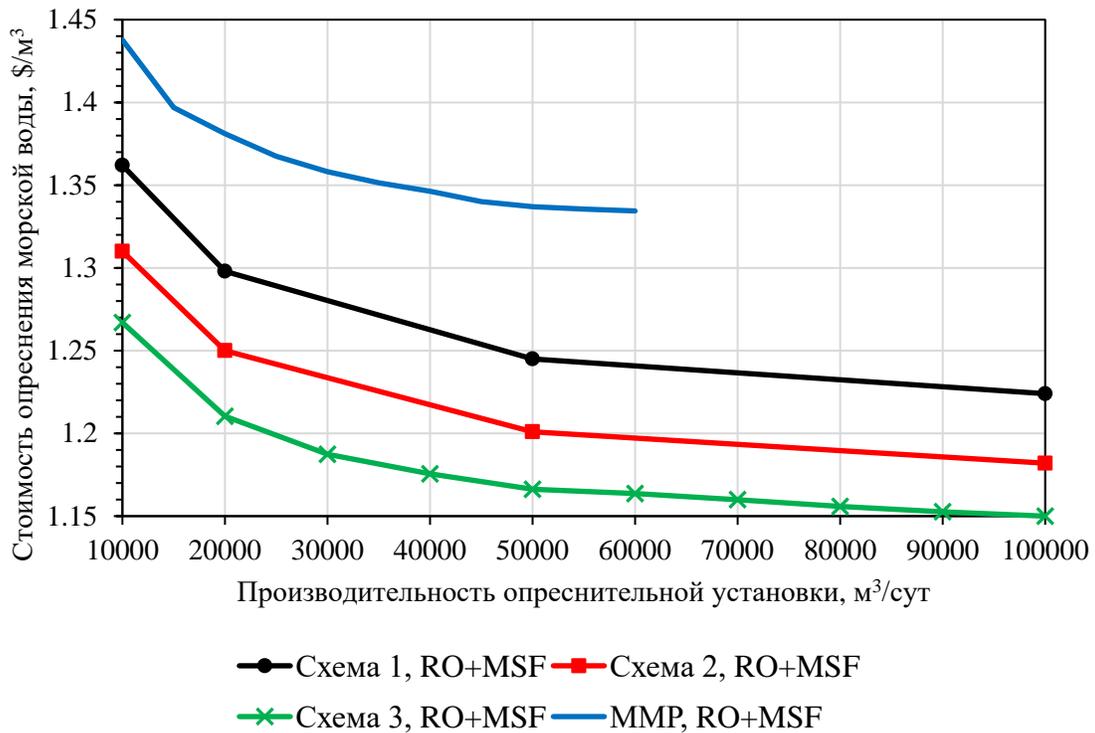


Рисунок 4.6. Стоимости получаемой пресной воды гибридной технологией RO+MSF, для разных вариантов комбинации ЯЭУ и ОУ в зависимости от производительности ОУ

На рис. 4.7 показано отношение стоимости опреснения с технологиями RO, MED и MSF с использованием MMP мощностью 50 МВт_{эл} к стоимости опреснения реактором большой мощности (1000 МВт_{эл}) с производительностью опреснения 20000 м³/сут. Из этого рисунка можно заметить, что стоимость получаемой пресной воды можно снизить, если использовать несколько небольших реакторов в качестве МАК, каждый мощностью 50 МВт_{эл}. Можно сделать вывод, что при такой мощности каждого небольшого реактора даже при увеличении количества реакторов до десяти в одном комплексе, стоимость опреснения все еще будет примерно на 4,7%, 6,7% и 9% выше для технологий RO, MED и MSF, соответственно по сравнению с вариантом, в котором используется реактор большой мощности того же типа.

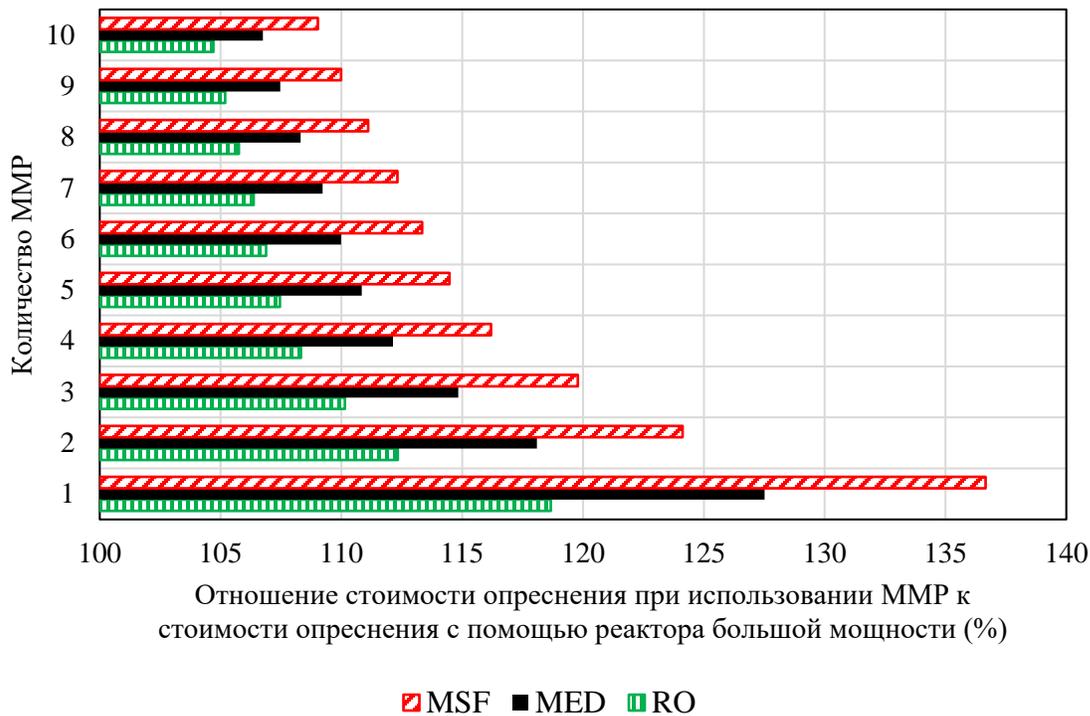


Рисунок 4.7. Сравнение стоимостей опреснения для разных технологий опреснения, в зависимости от количества ММР, мощностью каждого реактора 50 МВт_{эл}

При использовании ММР мощностью около 110 МВт_{эл}, отношение затрат на опреснения для варианта с типичным реактором большой мощности будет отличаться от предыдущего варианта МАК при котором, мощность каждого реактора составляет 50 МВт_{эл} (см. рис. 4.8). Стоимость опреснения с использованием одного реактора мощностью 110 МВт примерно на 10%, 14% и 19% выше для технологий RO, MED и MSF, соответственно по сравнению с ЯЭУ с реактором мощностью 1000 МВт_{эл}. Интересный вывод, который можно сделать, заключается в том, что стоимость опреснения с использованием 6 малых реакторов в качестве МАК немного меньше, чем стоимость опреснения по сравнению с использованием реактора мощностью 1000 МВт_{эл}. С использованием девять малых реакторов в качестве МАК общей мощностью около 1000 МВт_{эл}, стоимость опреснения с помощью технологий RO, MED и MSF может быть снижена примерно на 1,5%, 3% и 4%, соответственно по сравнению с использованием одного реактора мощностью 1000 МВт в качестве источника энергии для опреснения в Иране.

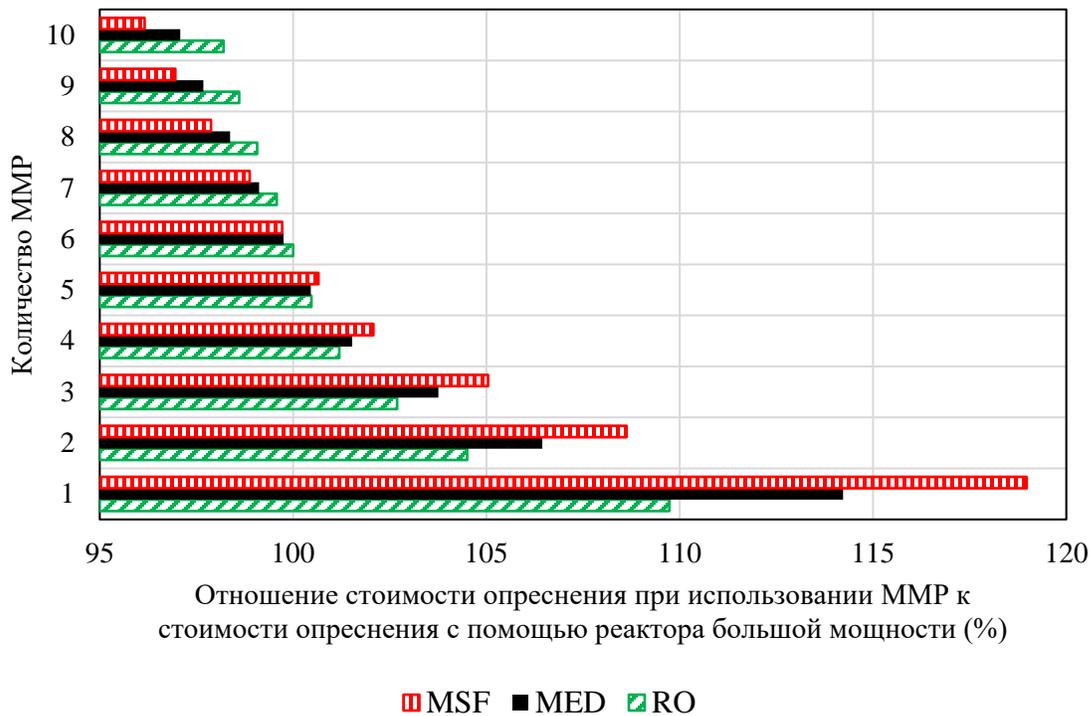


Рисунок 4.8. Сравнение стоимостей опреснения для разных технологий опреснения, в зависимости от количества ММР, мощностью каждого реактора 110 МВт_{эл}

Заключение

Для обоснованного выбора наиболее эффективных в экономическом отношении схем и систем (оборудования) двухцелевых атомно–опреснительных комплексов необходимо иметь надёжный инструмент сравнительного технико–экономического анализа вариантов этих комплексов с различными типами и мощностями как в ядерной энергетической их части (ядерный реактор, парогенераторы, паровые турбины), так и в опреснительной части, имея в виду технологию многоколонной дистилляции – MED, технологию мгновенного вскипания – MSF, технологию обратного осмоса – RO и гибридные технологии (MED+ RO и MSF+RO). В качестве такого инструмента нами совместно с коллегами (Садеги Хашаяр, Соколова Екатерина Андреевна) разработана компьютерная программа «Экономико-термодинамический Анализ Ядерно-опреснительного Комплекса, ЭТАЯОК».

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

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

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему:

1. Выполненный в ее обзорной части анализ современного состояния и развития крупномасштабных опреснительных производств в Иране убедительно показывает на необходимость ускоренного развития этих производств – как в связи с растущими потребностями в электроэнергии и пресной воде, так и в связи с наличием в Иране протяжённых территорий, омываемых водами Персидского и Оманского заливов. Атомное опреснение, т. е. опреснение с использованием энергии, производимой атомными электростанциями, как нельзя лучше соответствует реализации целей такого развития, так как оно экологически чистое и позволяет экономить ценное органическое топливо (нефть, мазут, природный газ), в основном используемое в настоящее время как источник энергии опреснительных производств.

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

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

4. При использовании охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ в качестве питательной воды систем опреснения, температура которой находится примерно на уровне 36 °С, степень гибридизации, необходимая для получения приемлемого качества опресненной воды составляет 22%. При этом стоимость опреснения гибридными технологиями RO+MSF и RO+MED составляет 1,06 \$/м³ и 0,91 \$/м³, соответственно. Среди гибридных схем опреснения использование охлаждающей воды конденсатора турбины ЯЭУ является наиболее экономичной конфигурацией, что приводит к снижению стоимости опреснения на 6% для технологии RO+MSF и на 7,4% для технологии RO+MED.

5. В принципе можно использовать как реакторы большой мощности, так и малые модульные реакторы в сочетании с ОУ для одновременного производства электроэнергии и пресной воды. Проводимый нами экономический анализ показывает, что, если использовать несколько модульных реакторов на одной площадке для обеспечения необходимой тепловой энергии и электричества ОУ, конкурентоспособность в части экономических показателей может быть достигнута по сравнению с реактором большой

мощности. Например, при общей мощности 1000 МВт, стоимость опреснения с использованием ММР примерно на 1,5%, 3% и 4% меньше, чем стоимость получаемой пресной воды с использованием реактора большой мощности для технологий RO, MED и MSF, соответственно. Учитывая потенциальные преимущества малых модульных реакторов в качестве МАК, такие как компактность, гибкость в эксплуатации, высокая степень безопасности и меньшее время сооружения, использование ММР может быть рекомендовано таким странам, как Иран.

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК

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

Публикации в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science

4. S. H. Ghazaie, KH. Sadeghi, E. Sokolova, E. Fedorovich and A.S. Shirani; Comparative analysis of hybrid desalination technologies powered by SMR // Journal of Energies, (2020), 13, 5006.
5. S. H. Ghazaie, K. Sadeghi, E. Fedorovich, E. Sokolova, and S. Makhuhin, Assessment of the integrated nuclear plant for electricity production and seawater desalination in Iran // Desalination and Water Treatment, 188, (2020), P 20-30.

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

Публикации в материалах международных и всероссийских конференций

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

Установки Электрической И Тепловой Энергией // III- ая Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и экономика энергетики», Санкт-Петербург, (2020), Р 162.

14. E. A. Sokolova, E. D. Fedorovich, K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, M. V. Konushin, перспективы создания и использовании многоцелевых атомных энерготехнологических комплексов для производства электроэнергии, теплоснабжения и крупнотонажного опреснения морской воды // Инновации в атомной энергетике: сб. тезисов докладов конференции молодых специалистов (2019), Москва, Изд-во АО

«НИКИЭТ».

15. X. Садеги, С.Х. Газаи, Е.А. Соколова, Е. Д. Федорович; Экономический Анализ Сочетания Различных Гибридных Схем Опреснительной Установки С Аэс «Бушер-2» // III- ая Международная научно- практическая конференция «Современные технологии и экономика энергетики»; Санкт-Петербург, (2020), Р 36-38.

16. E. Sokolova, K. Sadeghi, S. H. Ghazaie, D. Barsi, F. Satta, P. Zunino, Feasibility of Hybrid Desalination Plants Coupled with Small Gas Turbine CHP Systems // 15th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES, Cologne, Germany, (2020).

Сведения о форумах

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

Государственная регистрация программы для ЭВМ

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