

На правах рукописи



НАИМИ АББАС

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ**

Специальность – 05.04.12 – Турбомашинны и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт–Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Рассохин Виктор Александрович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты: **Сударев Анатолий Владимирович**
доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Научный Центр «Керамические Двигатели им. А.М.Бойко», г. Санкт-Петербург

Лыков Алексей Викторович
кандидат технических наук, инженер-конструктор 1 категории СКБ «Турбина» ЛМЗ, ПАО «Силовые машины - ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), Россия, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «23» мая 2017г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте (<http://www.spbstu.ru>) и в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан «___» _____ 2017г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета Д 212.229.06, к.т.н., доцент

Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования определяется тем фактом, что в настоящее время обеспечение водой таких сфер, как сельское хозяйство, промышленность, является одной из главных и серьезных проблем в Иране.

Отсутствие пресной воды не временная проблема в стране или районе, но долгосрочная и существенная проблема для выживания человека и развития обществ на нашей планете. В районе Ближнего Востока, большинство стран не имеют доступа к достаточному количеству пресной воды. С другой стороны они окружены неограниченным количеством морской воды. Таким образом, опреснение морской воды является хорошим решением для производства пресной воды.

Иран имеет значительное количество газотурбинных установок, которые были расположены недалеко от побережья региона. Из-за нехватки свежей воды в Иране, эти электростанции могут использоваться для обеспечения пресной воды.

В последние годы многие газовые турбины, работающие в открытом цикле в Иране были преобразованы в режим комбинированного цикла с целью повышения тепловой эффективности. Но на многих электростанциях, температура основного выхлопного стека газа по-прежнему высока, и поэтому можно использовать дополнительное тепло при снижении температуры выхлопных газов до допустимого значения в качестве входного источника энергии для тепловой установки по опреснению воды.

Объект исследования. Процесс опреснения морской воды на основе газотурбинной установки с использованием критериев эффективности энергии и эксэргии газовой турбины (ГТ).

Предмет исследования. Газотурбинная установка и его взаимодействие с опреснительной системой.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка научно-технических основ создания систем децентрализованной когенерации электроэнергии и получения пресной воды, которые используют газовую турбину в качестве первичного источника.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- Обзор и изучения состояния и перспективы развития энергетики в Иране;
- Изучение различных методов опреснения воды, их сравнение и выявление преимуществ и недостатков;
- Изучение различных видов газовых турбин и области их использования в Иране;

- Выбор собственной ГТ для целей когенерации электроэнергии и пресной воды на основе анализа существующих ГТУ и с учетом экологических и расположенных требований;
- Моделирование установки децентрализованной когенерации электроэнергии и пресной воды на базе газовой турбины;
- Технико-экономические исследования ГТ Solar Centaur 40 для децентрализованной когенерации электроэнергии и пресной воды;
- Обзор условий и критериев производительности ГТУ с впрыском пара для анализа комбинированных систем производства энергии и опреснения;

Научная новизна:

- выполнен анализ состояние энергетики различных энергоресурсов в Иране за последние десятилетия и влияния энергоресурсов на стабильность производства энергии. Представлены решения для повышения эффективности электростанций;
- проанализировано состояние водных ресурсов, системы опреснения воды на Ближнем Востоке и в мире, а также сравнение их мощностей с Ираном;
- обоснованы экономические и технические стороны децентрализованного производства с целью развития процессов опреснения воды и улучшения обеспечения водой в Иране;
- обосновано производство электроэнергии и пресной воды на основе: газотурбинной установки, двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на газовом топливе и распределительных сетей при помощи разных технологий опреснения морской воды;
- впервые выполнен анализ эффективности ГТУ с впрыском пара и его взаимодействие с опреснительной установкой;
- обоснованы условия и предложены критерия производительности ГТУ с впрыском пара для анализа комбинированных систем производства энергии и опреснения.

Личный вклад автора. Все обобщения, расчётно-теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в настоящей работе выполнены непосредственно автором.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты имеют важное практическое значение для Ирана. Решить задачу повышения выработки электроэнергии можно не только за счет строительства новых электростанций, но и путем модернизации действующих. В Иране есть проблема питьевой воды. С другой стороны в этой стране много электростанций находящихся на юге Ирана

рядом с Персидским заливом. Эти электростанции могут использоваться для обеспечения пресной воды.

Методология и методы исследования. В работе использовались как теоретические методы (идеализации, формализации), так и экспериментальные (моделирования, сравнения). В данной работе, при определении характеристик и производительности системы опреснения воды использовался пакет «Thermoflow».

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Компьютеризированные модели комбинированных систем на основе ГТ были подтверждены: (1) оценкой физической чувствительности результатов расчета для каждого компонента и для всего цикла, (2) возможностью относительных погрешностей только 10^{-4} в программе Aspen Plus (3) сравнением с имеющимися результатами, (4) оценкой относительных погрешностей в массовом и энергетическом балансе компьютеризированной модели устройства METVC, где ранее было установлено, что $<10^{-5}$ и далее $<10^{-13}$.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четыре глава, заключения, списка литературы.

Основной текст изложена на 136 страницах, диссертация содержит 38 рисунков, 51 таблицу, список использованных источников, включающий 75 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, приведены основные защищаемые положения, научная и практическая ценность работы, дано описание структуры диссертации.

В первой главе Рассмотрено положение водных ресурсов, системы опреснения воды на Ближнем Востоке и в мире, а также сравнение их мощности с Ираном. Затем приведен обзор различных методов опреснения воды, их сравнение и выявление преимуществ и недостатков. В конце первой главе описаны деятельности осуществляется в области опреснения воды.

Только за последние 45 лет достигнут высокий уровень выработки пресной воды: почти от нуля до 70 миллионов кубических метров в сутки и даже больше. А в мировом масштабе, было построено около 16000 единиц оборудования для опреснения воды. Интересен тот факт, что рост производства в 2000 году составлял до 26 миллионов кубических метров в сутки, в 2007 году - более, чем до 45.5 миллионов кубических метров в сутки, а производство в 2012 году достигло почти 70 миллионов кубических метров в сутки.

В настоящее время только около 500 тысяч кубических метров морской воды опреснено в Иране. Эта цифра эквивалентна лишь 7 литрам производимой воды

на каждого иранца в день. И это несмотря на то, что страны Персидского залива такие, как Саудовская Аравия и Объединенные Арабские Эмираты, сделали крупные инвестиции в область опреснения воды, и, имея меньшую численность населения, используют в несколько раз больше воды из Персидского залива, чем Иран. В Саудовской Аравии производится более 180 литров на душу населения в день, а в Объединенных Арабских Эмиратах - около 1000 литров в сутки на одного человека. Этот объем в 150 раз выше, чем объем производимой пресной воды на душу населения в Иране.

Известно, что коммерчески доступны три вида крупноразмерного опреснения морской воды: Многоэтапное испарение (MSF), многоколонная дистилляция (MED) и обратный осмос (RO). Существенное различие между этими процессами состоит в различных требованиях к потреблению энергии, входной тепловой энергии для MSF и MED или электрической энергии для RO. Иран имеет значительное количество газотурбинных установок, которые были расположены недалеко от побережья региона. Из-за нехватки свежей воды в Иране, эти электростанции могут использоваться для обеспечения пресной воды.

Во **второй главе** представлен обзор и современное состояние развития энергетики в Иране. Приведены структура выработки энергии; рассмотрены объемы выработки электрической энергии на тепловых станциях в Иране. И в заключение главы, поскольку основная часть энергии теряется на электростанциях, решения представлены для повышения эффективности электростанции. Целью данной главы является обзор трендов в области производства энергии от различных энергоресурсов в Иране за последние десятилетия и влияние энергоресурсов на стабильность производства энергии.

Рис. 1 иллюстрирует общий объем производства первичной энергии Ирана в 2012 году. Потребление первичной энергии Ирана выросло более чем на 50% за последние 10 лет. Для того, чтобы сократить нерациональное использование энергии и ограничить рост внутреннего спроса, Иран приступил к осуществлению реформ субсидирования энергетики, целью которых стало повышение цен на нефть, природный газ и электричество, произведенные в Иране. Рис. 2 показывает долю потребления энергии в различных секторах в 2012 году.

Природный газ является самым крупным источником топлива для производства электроэнергии в Иране и составляет почти 70% от общего объема производства. Остальные источники топлива, используемого для выработки электроэнергии в Иране, - это нефть, энергия воды, уголь, и неводные возобновляемые источники энергии, с граничной генерацией от атомных электростанций, которые вошли в эксплуатацию в 2011 году, но не начинали коммерческое производство до 2013

года. Рис. 3 отображает долю каждого типа электростанции в удовлетворении спроса на электроэнергию.

Потребление энергии в Иране намного выше международных стандартов. Иран перерабатывает 28 процентов своих отработанных нефти и газа, в то время как для некоторых стран этот показатель составляет 60 процентов. После изучения долгосрочных тенденций производства энергии из ископаемых ресурсов, можно предположить, что в 2019 производство энергии из ископаемых ресурсов будет снижаться, и ресурсы ископаемого топлива в Иране будут кончаться. Вышеупомянутые проблемы могут быть решены, и переход к устойчивой системе производства энергии может быть осуществлен путем внедрения следующих действий:

- Увеличение эффективности энергоснабжения;
- Использование вторичных ресурсов на предприятиях по производству энергии в комплексе для предотвращения опреснения морской воды;
- Учёт затрат, обусловленных использованием невозобновляемых энергетических ресурсов, таких как нефть, необходимое уменьшение производственных затрат;
- Поддержка научно-исследовательских центров и расширение исследовательских программ для развития технологий опреснения, которые станут конкурентоспособными в долгосрочной перспективе (более 10 лет);
- Обеспечение устойчивого производства и доступной энергии для бедных и изолированных районов страны.

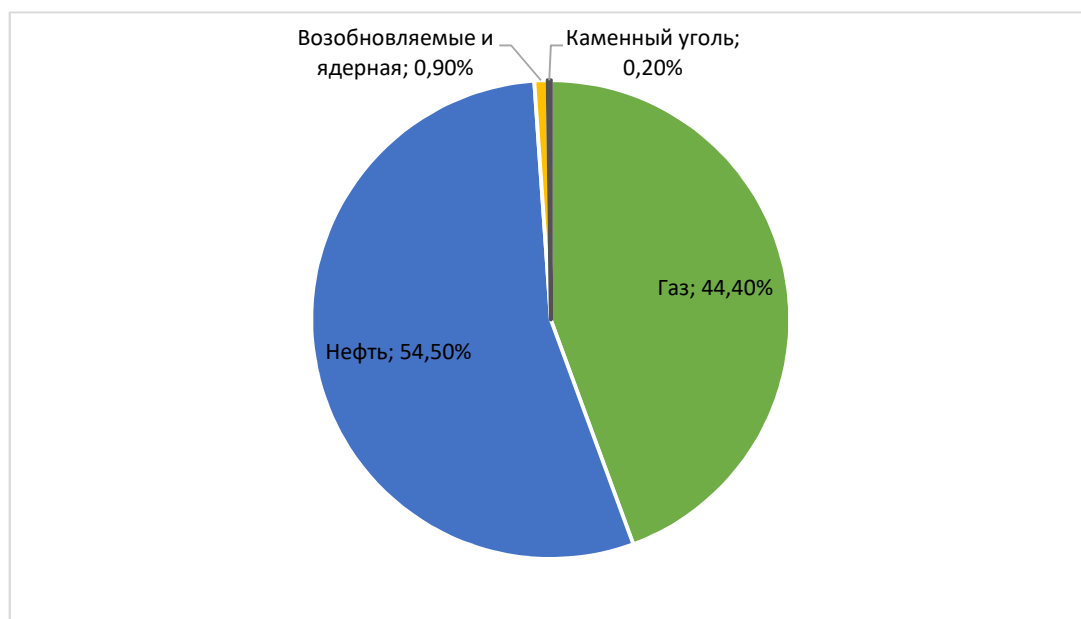


Рисунок 1 Общий объем производства первичной энергии Ирана в 2012 году

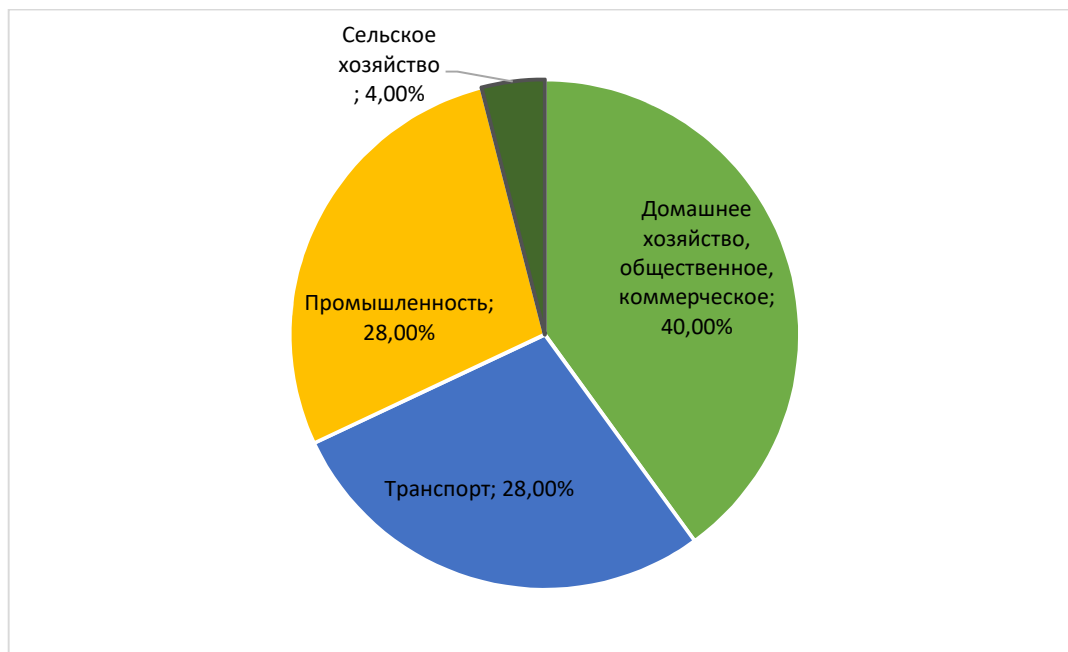


Рисунок 2 Доля потребления энергии в различных секторах в Иране



Рисунок 3 Доля каждого типа электростанции в удовлетворении спроса на электроэнергию

Третья глава посвящена теоретическому исследованию и выбору параметров и характеристик установки когенерации электроэнергии и пресной воды. Представлена математическая модель котла-утилизатора и конденсатора и затем рассчитана минимальная работа, необходимая для опреснения морской воды. В данной главе также рассмотрены экономические, технические стороны децентрализованного производства с целью развития процессов опреснения воды и улучшения обеспечения водой в Иране.

Чтобы сравнить децентрализованное производство электроэнергии и пресной воды с опреснением воды на основе электричества в распределительной сети,

смоделированы два генератора: газовая турбина и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на газовом топливе. Децентрализованное производство когенерации электроэнергии и пресной воды на основе газовой турбины и на основе ДВС смоделированы при помощи технологий MED, RO и смешанной технологии (MED+RO). В таблице 1 показана мощность производства воды и электричества в различных методах опреснения воды. При этом ежедневное потребление воды рассчитывается с учетом 190 литров в день.

Таблица 1 Мощность производства воды и электричества в различных методах опреснения воды при стандартных условиях

Генератор энергии	Технологии опреснение воды	Производство электроэнергии (кВт.ч)	Производство пресной воды (м ³ / сут)	Народонаселение (в тысячах людей)
Газовая турбина	Гибрид	24	16183	85.2
	MED	3212	1063	5.6
	RO	112	15120	79.6
ДВС	Гибрид	10	14595	76.8
	MED	3017	339	1.8
	RO	38	14256	75.0

На рисунке 4 представлены окончательные цены на опреснение воды с использованием разных систем (которые показаны безразмерно на основе расхода на производство с применением электричества в распределительной сети). На основе перечисленных данных можно сделать вывод, что применение децентрализованного производства на основе ДВС не выгодно по цене. Расходы на производство пресной воды также больше, чем расходы на применение электричества в распределительной сети и газовой турбины. Хотя в случае применения децентрализованного производства на основе газовой турбины, расход на производство воды в методах RO и MED+RO уменьшается на 7-10 % в сравнении с производством пресной воды с помощью электричества в распределительной сети. Расход на производство воды с применением смешанного опреснения воды на основе газовой турбины на 2% больше, чем на основе RO. Но с учетом восстановления топлива, уменьшения температуры и загрязнённых выходящих газ в смешанном опреснении воды, данный вариант является более подходящим вариантом с экологической точки зрения.

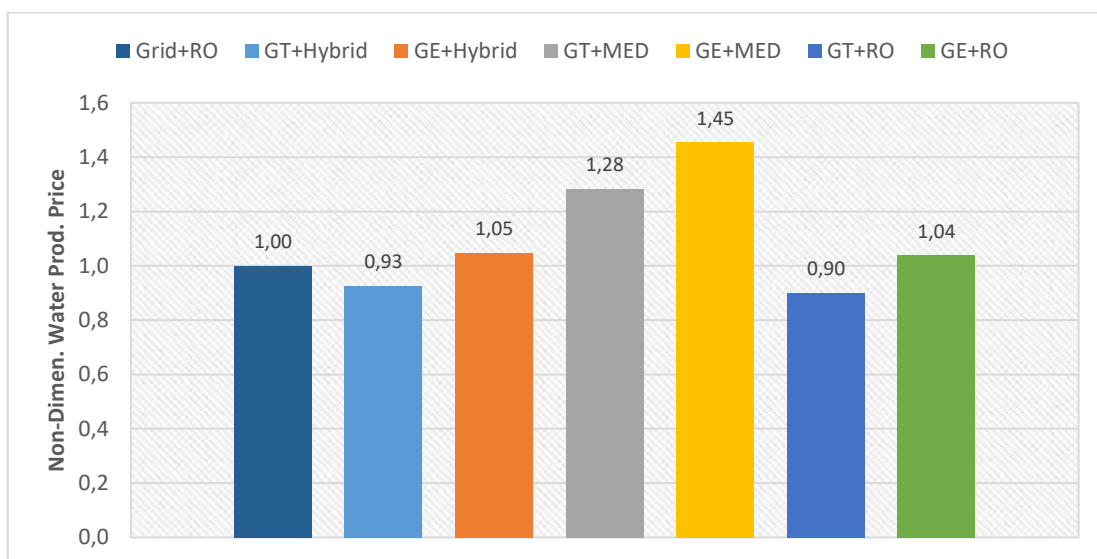


Рисунок 4 Расходы на опреснения воды в различных сценариях при стандартных условиях

В данной работе, при определении характеристик и производительности системы опреснения воды использовался пакет «Thermoflow». Рис. 5 показывает модель, с помощью которой представлена данная программа.

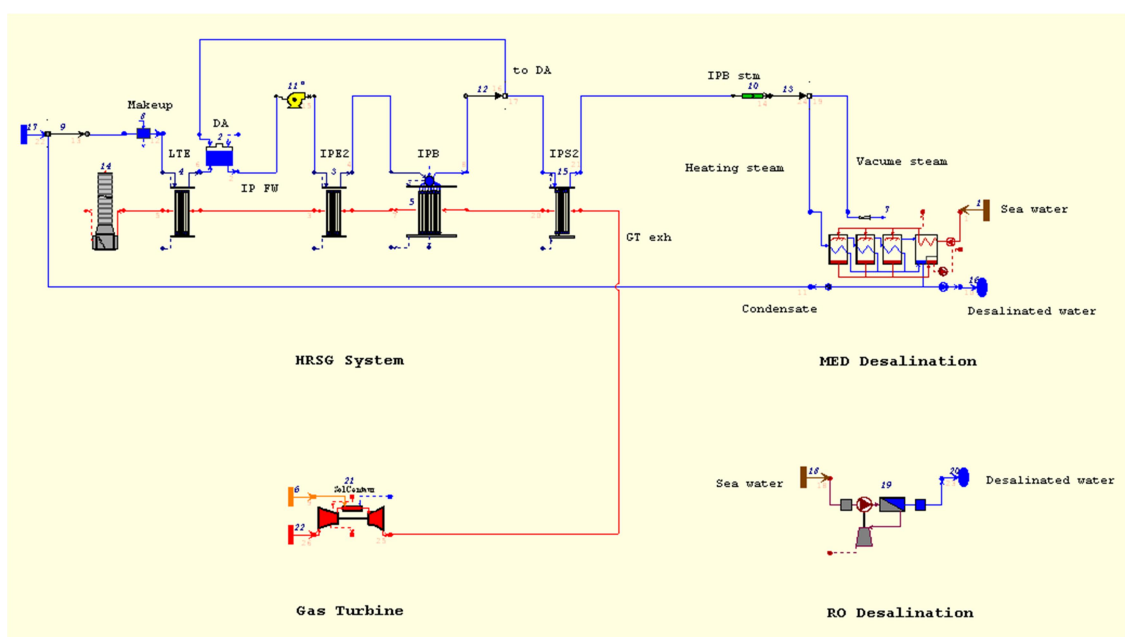


Рисунок 5 Модель блока когенерации электроэнергии и питьевой воды с помощью **газовых турбин** и сочетание методов опреснения

Газовая турбина Solar Centaur 40, которая использовалась в данной работе, имеет 11-ступенчатый осевой компрессор. Она имеет форму гибрида и может работать с газовым и жидким топливом. Данная газовая турбина имеет номинальную мощность 3,5 МВт и производительность 27%. Турбины Solar широко применяются в нефтегазовой отрасли и электрогенерирующих установках Ирана.

В четвертой главе проанализировано использование циклов ГТУ с впрыском пара в объединенной системе опреснения воды и производства электроэнергии с использованием критериев эффективности энергии и эксергии. Дается краткое описание и обоснование условий циклов ГТ и систем производства электроэнергии и пресной воды двойного назначения. Смоделирована и проанализирована установка теплового опреснения. Полученные результаты привели к выбору системы парокompрессионной и многоколонной дистилляции (METVC) для получения пресной воды из морской воды; далее была исследована производительность систем на основе ГТУ с впрыском пара.

Целью данной главы является изучение энергии, эксергии и эффективности производства воды с помощью интегрированных систем производства энергии и воды, которые используют газовую турбину в качестве первичного двигателя. Чтобы изучить производительность и выбор параметров при производстве воды, была смоделирована и проанализирована теплоопреснительная установка, также была исследована комбинированная система, созданная на предприятии с газотурбинной установкой с впрыском пара.

Проведенный анализ улучшил понимание систем на основе ГТУ с впрыском пара для производства электроэнергии и опреснения воды, а также способов их улучшения и оптимизации. Некоторые отдельно взятые выводы: (1) скорость закачки пара в цикле ГТУ с впрыском пара оказывает сильное влияние на производство воды и электроэнергии и предлагает широкие возможности для проектирования и эксплуатации; (2) более высокий коэффициент давления и более высокие скорости закачки пара цикла ГТУ с впрыском пара увеличивают производство энергии, но снижают темпы добычи воды. Более высокие температуры на входе турбины увеличивают производство энергии и воды; (3) особый прирост производства воды может быть получен путем извлечения энергии из дымовых газов. Данные результаты указывают на то, что подобные системы двойного назначения обладают высоким уровнем синергии не только при утилизации топлива, но и в эксплуатации, в утилизации топлива, а так же предоставляют в эксплуатации свободу выбора конструкционных решений.

Рисунок 6 схематически иллюстрирует четыре эффекта (И1-И4 с взаимодействующими ИЯ1-ИЯ4) теплового сжатия пара (TVC) с подогревателями морской воды (ПН1, ПН2, ПН3), которые являются сочетанием парового эжектора и традиционного опреснения многократного действия (MED).

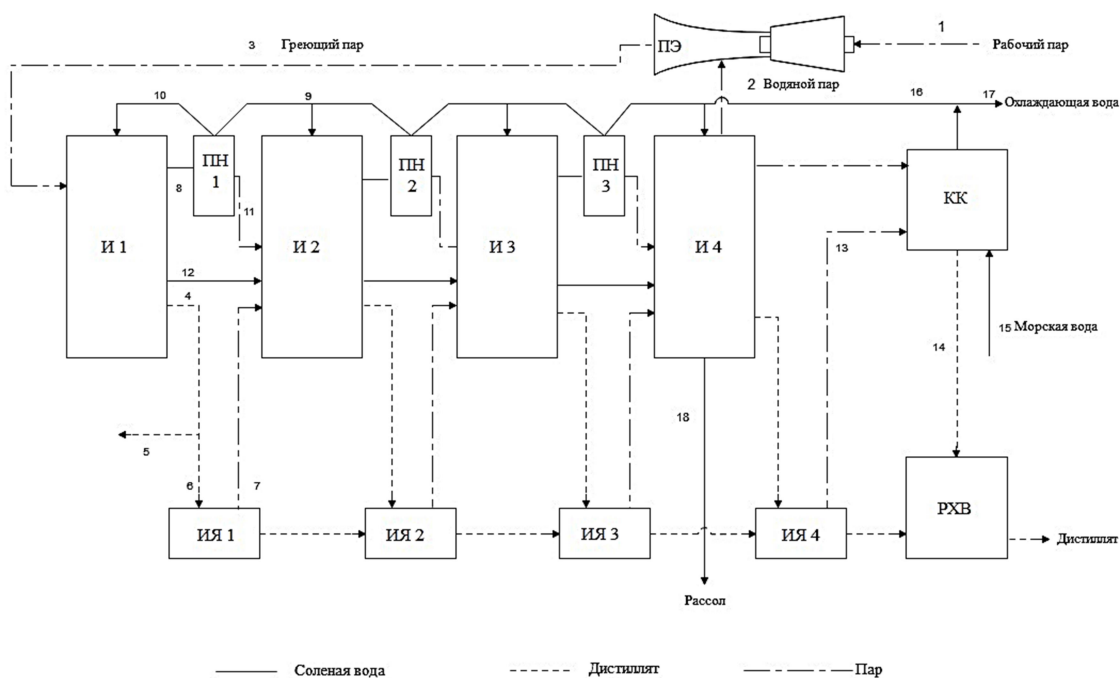


Рисунок 6 Принципиальная схема многоколонной дистилляции с паром-эжектором
 КК, Конечный конденсатор; И1-И4, Испаритель; ИЯ1-ИЯ4, Испарительный ящик; ПН1-ПН3,
 Предварительный нагреватель; ПЭ, Паровой эжектор; РХВ, Резервуар для хранения воды

Управляемый движущим паром (1), паровой эжектор (ПЭ) погружает и сжимает часть водяного пара (2), полученного в последнем эффекте (И4). Пар (3), который называется нагревающим паром, выходит из парового эжектора (ПЭ) и конденсируется в И1 и производит энергию для испарения морской воды. Часть конденсата (5) возвращается в котел или котел-утилизатор тепла отходящих газов (КУ), а оставшаяся часть (6) вводится в соответствующий испарительный ящик (ИЯ1), где небольшое количество пара (7) испаряется путём внезапного понижения давления. Пар (8), выпариваемый из морской воды в И1 проходит через предварительный нагреватель (ПН1) для предварительного нагрева питающей морской воды (9), а затем направляется во второй эффект (И2) вместе с испаренным паром (7) из ИЯ1, выступающим в качестве источника тепла в И2. Сбалансированный солевой раствор (12) от И1 перетекает во второй эффект (И2) и, испаряясь, производит пар. Этот процесс повторяется для всех эффектов вплоть до последнего. Часть пара (2), образованная в последнем эффекте захватывается паровым эжектором, а оставшая часть (13) вводится в конечный конденсатор (КК), где пар высвобождает скрытую теплоту путем нагрева морской воды (15). Часть нагретой морской воды (16) используется в качестве сырья для системы парокomppressorной дистилляции опреснения многократного действия METVC, а остаток (17) отправляется назад в море.

Критерии производительности.

1. Тепловая эффективность η_t и эффективность эксергии ε_e циклов:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_f} = \frac{W}{m_f q_f} \quad (1)$$

$$\varepsilon_e = \frac{W}{E_f} = \frac{W}{m_f e_f} \quad (2)$$

Где W чистая выходная мощность газовой турбины предприятия, m_f – масса топлива, поступающего в камеру сгорания, а q_f и e_f низкая теплота сгорания и удельная эксергия топлива, соответственно.

2. Коэффициент потери тепла χ_t и коэффициент потери эксергии χ_e каждого компонента. Коэффициент потери тепла χ_t это потери тепла Q_l в каждом компоненте как часть входной энергии топлива Q_f , и коэффициент потери эксергии χ_e потеря эксергии E_l к эксергии топлива E_f :

$$\chi_t = \frac{Q_l}{Q_f} = \frac{Q_l}{m_f q_f} \quad (3)$$

$$\chi_e = \frac{E_l}{E_f} = \frac{E_l}{m_f e_f} \quad (4)$$

3. Коэффициент восстановления тепла ξ_t и коэффициент восстановления эксергии ξ_e . В сочетании двух исследуемых систем, часть выходящей энергии газа восстанавливается путем впрыска пара в парогенератор установки утилизации тепла (КУ) в ГТУ с впрыском пара, затем они возвращаются в камеру сгорания; часть энергии восстанавливается рабочим паром, используемым в качестве источника тепла для опреснения воды. Очевидно, что повышение показателей восстановления тепла улучшает эффективность процесса, и используемые критерии это ξ_t , восстановленное тепло Q_r как часть энергии входящего топлива Q_f и ξ_e восстановленная эксергия E_r как часть эксергии входящего топлива E_f :

$$\xi_t = \frac{Q_r}{Q_f} = \frac{Q_r}{m_f q_f} \quad (5)$$

$$\xi_e = \frac{E_r}{E_f} = \frac{E_r}{m_f e_f} \quad (6)$$

4. Коэффициент энергия-в-воду R_{pw} .

Коэффициент энергия-в-воду R_{pw} это коэффициент выработанной энергии w к массе добываемой воды m_w , что является ключевым фактором при определении эффективности комбинированного производства энергии и воды.

$$R_{pw} = w/m_w \quad (7)$$

MW/MIGD часто используется в качестве единицы R_{pw} (1 MIGD = 52.662 кг/сек).

Влияние коэффициента расхода пара (x_j). В цикле ГТУ с впрыском пара при указанных β и ТПТ, массовое соотношение используемого пара к сжатому воздуху, x_j ,

$$x_j = m_j / m_a \quad (8)$$

является доминирующим фактором, влияющим на R_{pw} , поскольку оно определяет распределение энергии и эксергии отработанного газа в КУ между поданным паром и рабочим паром и, следовательно, энергии топлива и распределения эксергии для производства электроэнергии и воды.

Рисунок 7 показывает влияние x_j а рисунок 8 является примером использования энергии и эксергии при разных x_j . Повышение x_j увеличивает количество тепловой энергии и эксергии отработанного газа газовой турбины, который используется для производства пара для ввода, что уменьшает количество доступной для опреснения воды (Рис. 8). Это приводит к увеличению выработки электроэнергии и снижению количества производимой воды (Рис. 7). Очевидно, что увеличение x_j также повышает потребление воды, тем самым еще больше сокращая количество произведенной воды (Рис. 8). При определенном значении x_j , чистая добыча воды $m_{w,net}$ становится нулевой (Рис. 8).

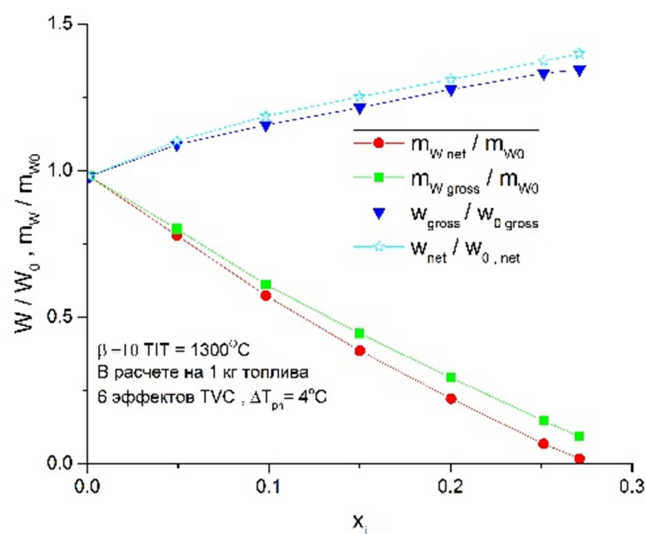


Рисунок 7 Нормированное производство электроэнергии и пресной воды в зависимости от x_j .

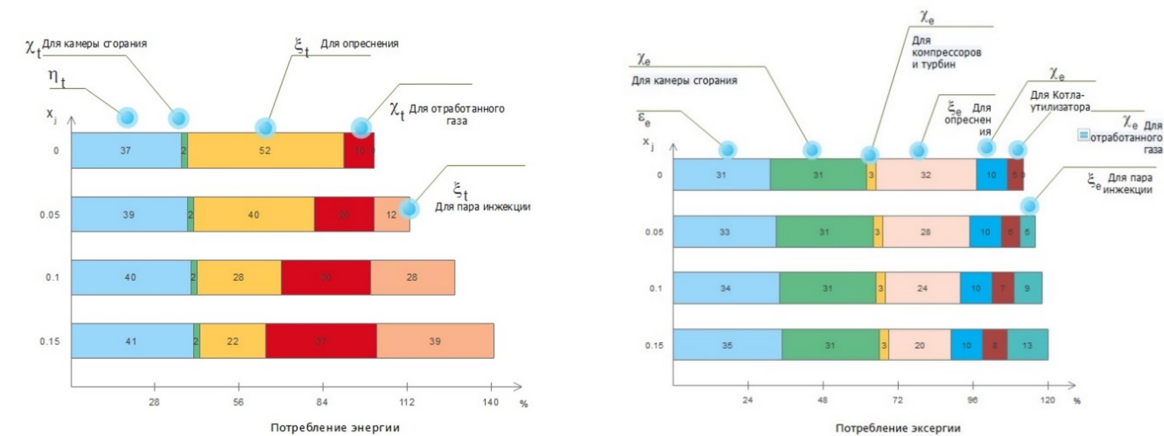


Рисунок 8 Использование эксергии и энергии комбинированной системы на базе цикла ГТУ с впрыском пара для различных X_j . $\beta=10$; ТПТ=1300 °С

Влияние коэффициента давления β и температуры газа на входе в турбину (ТПТ) цикла. Рисунок 9 показывает эффективность эксергии ε_e и температурный КПД η_t цикла ГТУ с впрыском пара, так же как и коэффициент восстановления эксергии $\xi_{e,D}$ и коэффициент восстановления энергии $\xi_{t,D}$ для опреснения, для различных β (от 10 до 30), ТПТ (1100°С и 1300°С) и x_j (0.05 и 0.1). Мы можем видеть, что процентное соотношение топливной энергии / эксергии преобразуется в энергию и потребляется для опреснения. Хотя $\xi_{e,D}$ и $\xi_{t,D}$ представляют только тепловую энергию / эксергию для опреснения воды, они определяют производство воды, как показано ниже, таким образом, работа насоса является лишь малой частью расхода энергии при опреснении. Рисунок 10 показывает приведённую мощность и производство воды, а рисунок 11 - использование эксергии и энергия для различных β .

Эти рисунки показывают, что ε_e и η_t имеют ту же тенденцию, что и выработка электроэнергии w , в соответствии с определением ε_e и η_t в соотношениях (1) и (2). В пределах изученного β , для фиксированного x_j , более высокий β повышает ε_e , η_t и w . Увеличение ТПТ, как уже известно, также повышает эффективность производства электроэнергии.

Рисунки 9 и 10 также показывают что $\xi_{e,D}$ и $\xi_{t,D}$ и производство воды m_w имеют ту же тенденцию, в соответствии с определением $\xi_{e,D}$ и $\xi_{t,D}$ соотношениями (3) и (4). Противоположно влиянию β на мощность, m_w уменьшается с увеличением β , так как температура отработанного газа из газовой турбины ниже для более высокой β ; следовательно, меньше энергии и эксергии могут быть восстановлены для опреснения (Рис. 11).

Высокий ТПТ не только полезен для выработки электроэнергии в цикле ГТУ с впрыском пара, но и для скорости получения воды (Рис. 10), так как высокая температура на выходе из турбины дает больше энергии и эксергии доступных для опреснения воды.

Следует отметить, что $\xi_{e,D}$, $\xi_{t,D}$ и m_w уменьшаются более резко с β при ТПТ=1100°C, чем при ТПТ =1300°C, что определяется процессом переноса тепла в КУ. Как показано на Рисунке 12, когда ТПТ=1300°C и $\beta=30$, обработанный газ может быть охлажден до минимальной температуры, мы допускаем до 140°C, но когда ТПТ=1100°C, минимальный температурный перепад между двумя средами ΔT_p в КУ ограничивает процесс теплообмена. Для того, чтобы соответствовать минимальным ΔT_p мы допустили, что температура выхлопных газов на выходе из КУ в этом случае должна быть увеличена до 167.7°C, в результате чего более резкое снижение ξ_e и ξ_t , и, следовательно, m_w .

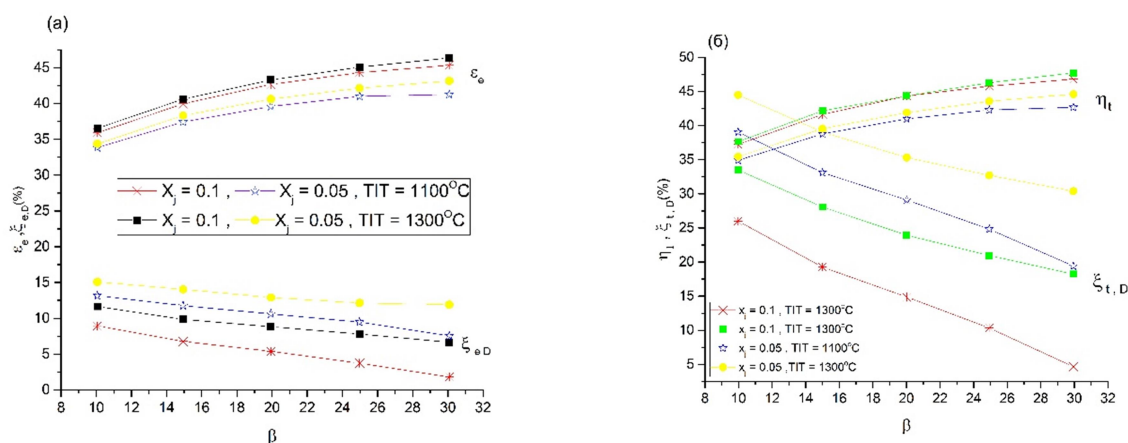


Рисунок 9 Влияние β и ТПТ на ϵ_e , η_t , $\xi_{e,D}$ и $\xi_{t,D}$ в комбинированной системе на базе цикла ГТУ с впрыском пара. (а) Вариации ϵ_e и $\xi_{e,D}$ с β и ТПТ; (б) Вариации η_t и $\xi_{t,D}$ с β и ТПТ

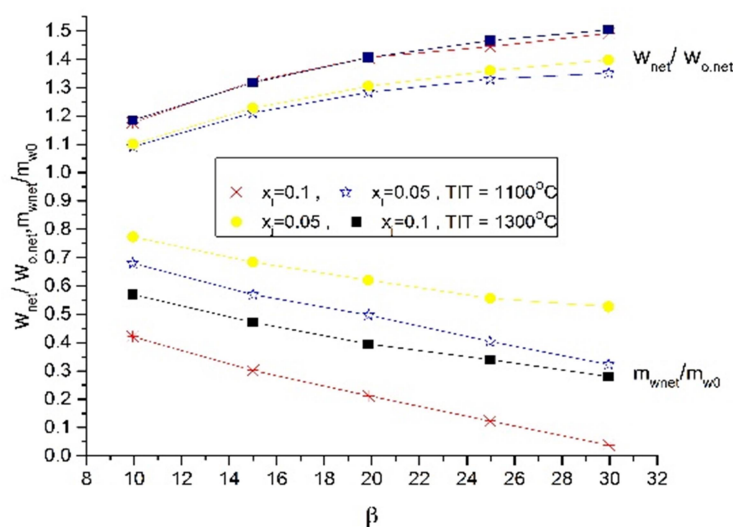


Рисунок 10 Нормированное производство электроэнергии и пресной воды в зависимости от β

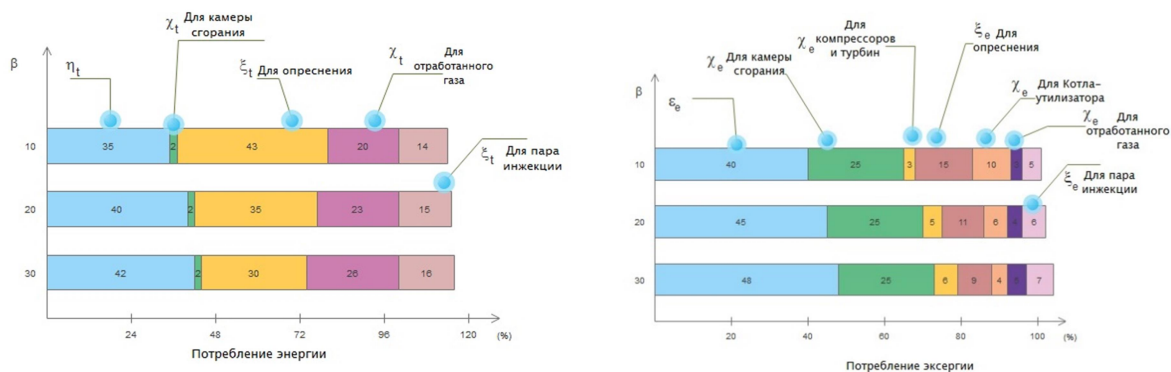


Рисунок 11 Использование эксергии и энергии комбинированной системы на базе цикла ГТУ с впрыском пара для различных β . ТГТ=1300 °С; $x_j=0.05$

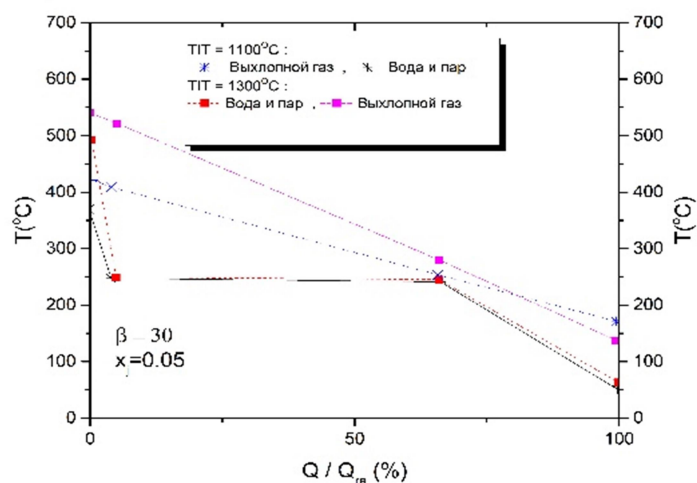


Рисунок 12 Схема теплообменника в различных ТВТ.

Восстановление энергии из отработанного газа. Рисунок 8 показывает, что энергия выпущенная в окружающую среду значительно возрастает с увеличением x_j из-за увеличения доли пара в отработанном газе, и соответствующего большего количества скрытой теплоты воды. Например, потери тепла и эксергии с отработанным газом составляют 19.3% и 5.2%, соответственно, при $\beta=10$, ТГТ=1300°С и $x_j=0.05$, и 34.9% и 7.1%, соответственно, когда $x_j=0.15$.

Трудно использовать тепло отработанных дымовых газов из-за их низкой температуры. Газ содержит водяной пар, и, таким образом, при охлаждении, в первую очередь теряет свое теплосодержание, пока температура не снизится до уровня конденсации водяного пара, в этой точке также выделяется скрытая теплота конденсации. Рисунок 13 показывает тепло, выделяющееся в процессе охлаждения дымового газа от 140°С до 40°С. Мы можем видеть, что когда $x_j=0.05$, больше 60% общего тепла выделяется в диапазоне температур от 57.5°С до 40°С при конденсации водяного пара в трубе, и когда $x_j=0.15$, около 80% тепла выделяется в диапазоне температур от 68.5°С до 40°С. Следовательно,

невозможно использовать это тепло для производства пара для опреснения воды.

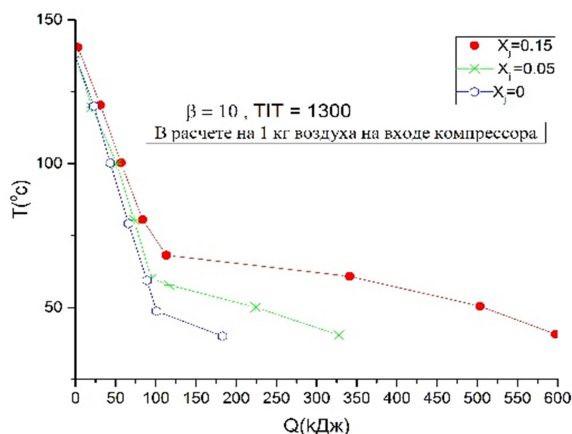


Рисунок 13 Тепло, выделяющееся в процессе охлаждения дымового газа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Чтобы сохранить хорошую экологию для будущих поколений Ирана, нужна стабильное и надежное производство энергии и питьевой воды. В настоящее время, с учетом кризиса энергии в мире, Иран нуждается в лучшем планировании для данной промышленности. Промышленность воды и энергии играет важную роль в экономическом развитии и безопасности страны. Технология производства воды (для различных потребителей, в том числе для питания, сельского хозяйства, промышленного сектора), субсидии на энергию, дистрибуция влияют на развитие Ирана.

2. Применение теплового опреснения исключительно для производства воды невыгодно по цене, поскольку стоимость производство воды высокая, а расход воды небольшой. Необходимо отметить, что, в данном случае 3 МВт.ч производится электроэнергии, что с учетом её цены продажи является выгодным. Такой вариант хорошо применять когда электрическая мощность – высокая и необходим небольшой объем пресной воды. Кроме этого, при применении теплового опреснения воды, мощность производства пресной воды с использованием газовой турбины в 3 раза больше, чем при производстве с использованием ДВС в аналогичных ситуациях.

3. С увеличением цены на топливо от 0,03 долл. до 0,20 долл. и 0,30, расход на производство электричества и воды растет при использовании теплоэлектрической электростанции (ТЭС) в сравнении с использованием электричества в распределительной сети. И становится еще менее доступным по цене. Можно сказать, что стоимость производства воды при ТЭС на основе

газовой турбины всегда меньше или равен расходам на производство воды на основе применения электричества в распределительной сети.

4. Система опреснения многоколонной дистилляции с впрыском пара предпочтительнее системы многоколонной дистилляции в случаях, когда давление рабочего пара достаточно высокое, $> \sim 3$ бар, для запуска парового эжектора, как и в двух комбинированных изученных системах.

5. Скорость подачи пара в цикле ГТУ с впрыском пара оказывает сильное влияние на производство воды и электроэнергии и предлагает широкие возможности для проектирования и эксплуатации.

6. Более высокая степень повышения давления в компрессоре и более высокие скорости подачи пара цикла ГТУ с впрыском пара увеличивают производство электроэнергии, но снижают объёмы добычи воды. Более высокие температуры на входе турбины увеличивают производство энергии и воды.

7. Дополнительный прирост воды может быть получен путем извлечения энергии из выхлопных газов. Данные результаты указывают на то, что подобные системы двойного назначения обладают высоким уровнем синергии при утилизации топлива. А также в эксплуатации предоставляют свободу выбора конструкционных решений.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Наими А., Рассохин В. А., Численное моделирование и технико-экономическое обоснование тепловых опреснительных установок // Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 4 (207) 2014 г., стр.71-80.

2. Наими А., Рассохин В. А., Необходимость повышения энергоэффективности электростанций Ирана в связи с развитием энергетических ресурсов // Успехи современной науки и образования, № 12 - 2016 г., стр.90-98.

3. Наими А., Рассохин В. А., Анализ эффективности тепловой опреснительной установки и его взаимодействие с газовой турбиной. Часть 1: Сравнение двух методов опреснения морской воды (MED и METVC) на основе газовых турбин// Журнал "Вестник БГТУ", № 2(54) 2017 г.