На правах рукописи

Aupre

АШРАФ ЭЛЬСАЙЕД АБДЕЛАЛИМ МОСТАФА ЭЛЬМОХЛАВИ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С СОЛНЕЧНЫМИ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЕГИПТА

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена на кафедре теоретических основ теплотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:	Очков Валерий Федорович доктор технических наук, профессор кафедры «ТОТ» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».
Официальные оппоненты:	Барочкин Евгений Витальевич доктор технических наук, профессор, кафедры тепловых электрических станций, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет «ИГЭУ».
	Теплов Борис Дмитриевич кандидат технических наук, главный специал- ист управления инвестиционного развития ООО «Сибирская генерирующая компания».
Ведущая организация:	Открытое акционерное общество « Энергетиче- ский институт им. Г.М. Кржижановского «ОАО ЭНИН».

Защита диссертации состоится «25» ноября 2020 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.006 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус Б ауд. Б-205.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и на сайте <u>www.mpei.ru</u>.

Автореферат разослан «___» ____ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета МЭИ.006 кандидат технических наук, доцент

of

Егошина О. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Анализ документов («Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», закон ФЗ - 261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности», "Sustainable Development Strategy: Egypt Vision 2030" (Стратегия устойчивого развития: видение Египта на период до 2030 г.)) показывает: повышение энергоэффективности генерирующих производств является приоритетным направлениями развития энергетики; проектируемые установки (ПГУ – КУ, ПГУ – ТЭЦ и др.) должны иметь, во-первых, высокую энергоэффективность и, во-вторых, отвечать современным требованиям надежности и экологичности. Показано, что теплосиловая схема, включающая классическую парогазовую установку с котлом - утилизатором (ПГУ - КУ), представляет собой очень привлекательную конфигурацию, в которой используется дешевое топливо и которая поставляет электроэнергию с высоким внутренним КПД (до 65 %). Действующие ПГУ- КУ имеют весьма высокую мощность (более 600 MBт).

В настоящее время производство электроэнергии с помощью технологии концентрированного солнечного энергии (КСЭ) совместно с соответствующей энергоустановкой стоит дороже, чем производство электроэнергии на сопоставимой традиционной ТЭС, работающей на ископаемом топливе. Отметим, что в технологии КСЭ используется только прямое нормальное излучение (DNI), поэтому ИСКЦ станция может обеспечивать производство теплоты и электроэнергии, как правило, в регионах с высоким DNI, то есть в регионах солнечного пояса с DNI> 2000 кВт·ч/м²/год. К ним относится ряд стран, включая Египет. В диссертации исследуются возобновляемые источники энергии, в том числе и солнечный ресурс. В соответствующем секторе производства электроэнергии существует два основных подхода:

1) производство электроэнергии с применением фотоэлектрического процесса или прямое преобразование солнечной энергии (ППЭ),

2) производство электроэнергии с использованием КСЭ.

Во втором подходе реализуются следующие этапы: а) теплоту, поступающую от солнечного ресурса (TCP), преобразуют в энтальпию рабочего тела, имеющего высокую температуру, б) организуют термодинамический цикл, включающий ГТУ, и преобразуют энтальпию рабочего тела в электрическую энергию. Это преобразование имеет косвенный характер; в общем случае такого преобразования теплота TCP используется: 1) для производства электроэнергии и теплоснабжения.

Наш анализ показывает, что затраты на создание установки, в которой применяется КСЭ, существенно уменьшаются в последние годы. С учетом этой тенденции солнечные фотоэлектрические технологии являются перспективными для производства электроэнергии.

При реализации второго подхода возникает ряд проблем, среди них проблема А обусловлена естественными перерывами в работе установке, в которую поступает теплота TCP, связанная с КСЭ. Для решения проблемы А привлекают:

1) аккумуляторы,

2) резервный источник энергии, работающий на традиционном топливе.

Цикл, который реализуется на основе установки, использующей КСЭ и резервный источник энергии, содержит два участка. Первый, включающий фотоэлектрическую систему, вырабатывает существенно переменную во времени выходную мощность, $N_{\kappa c 3}$, (так, мощность, $N_{\kappa c 3}$, может быстро нарастать, то есть иметь пикообразную форму; такой характер часто является не приемлемым для потребителя). Такой характер мощности, $N_{\kappa c 3}$, приводит к тому, второй участок должен, во-первых, вырабатывать электрическую мощность, которая является существенно переменной во времени. Во-вторых, внутренний КПД резервного источника является очень низким при работе в режимах, которые имеют пики.

Солнечная тепловая электростанция (СТЭС), использующая КСЭ, может рассматриваться как объект для гибридизации с другими технологиями, связанными с производством электроэнергии. Наш анализ показывает, что имеются примеры реализации гибридных технологий (ГТ), которые включают такой компонент, как технология КСЭ. Так, интеграция двух энергоустановок, из которых первая отвечает технологии КСЭ, а вторая представляет собой ПТУ, использующую ископаемое топливо, рассматривается как одно из перспективных решений для производства электроэнергии во многих регионах с высоким DNI. Эти решения именуются как ГКСЭ-ТЭС (гибридизация технологии КСЭ и технологии ТЭС).

В диссертации ставится задача: разработать технологию ГТ, которая объединяет технологию КСЭ и технологию ПГУ-КУ, а также ориентирована на реализацию в климатических условиях южного Египта. Интеграцию двух энергоустановок, из которых первая отвечает технологии КСЭ, а вторая представляет собой ПГУ – КУ, следует рассматривать как новый тип электростанций, который именуется в литературе как станция, реализующая интегрированный солнечный комбинированный цикл (ИСКЦ станция). Намечено использовать потенциальные преимущества, которые имеет подобная синергетическая система, а именно: надежность, повышенная эффективность, низкий уровень выбросов СО₂, возможность снизить расход топлива, низкие капитальные затраты при модернизации ПГУ-КУ в оптимальных условиях.

Теплосиловая схема ИСКЦ станции включает ряд блоков (солнечное поле, ГТУ, ПТУ, котел утилизатор и др.), и для оценки ее работы используют тепловой КПД или тепловую эффективность (η_{ucku}) (см. (2) ниже) и такие критерии, как: электрическая мощность блока ГТУ ($N_{rтy}$); электрическая мощность блока ПТУ ($N_{nтy_иcku}$); полная электрическая мощность ИСКЦ установки (N_{ucku}); дополнительная мощность ПТУ, связанная с КСЭ (ΔN_{con}) (см. (3) ниже); полученная тепловая мощность от солнечного ресурса ($Q_{con,ren}$), тепловая мощность, подведенная в ПГУ (Q_{1_nry}); коэффициент конверсии ($\eta_{con,ren}$), который относится к тепловой мощности, $Q_{con,ren}$, (см. (5) ниже).

Важным положительным фактором является то, что ИСКЦ станция производит так называемую диспетчеризуемую электроэнергию (диспетчеризация представляет собой способность СТЭС обеспечивать потребителя электроэнергией по требованию диспетчера /оператора); наряду с этим синергия различных источников энергии допускает оптимизацию за счет чередования работы источников с целью повышения общей эффективности комбинированной энергоустановки. Еще одним преимуществом технологии КСЭ является то, что ИСКЦ установки, которые используют КСЭ и содержат аккумуляторы, обеспечивают хранение тепловой энергии (ХТЭ) и превращают прерывистый солнечный ресурс в диспетчеризуемый ресурс.

Наш анализ позволяет сделать вывод, что ИСКЦ станция представляет интерес для практической выработки электроэнергии в климатических условиях южного Египта.

Цели и задачи работы

Целью диссертации является разработка рекомендаций и методических основ для схемной и параметрической оптимизации ИСКЦ установок для условий Египта; оптимизация позволит установить режимы работы ИСКЦ установок, а также сократить сроки окупаемости для новых мощностей и снизить стоимость как электрической, так и тепловой энергии для конечного потребителя.

Для достижения научной цели были поставлены и решены следующие задачи диссертационного исследования.

1. На основании обзора, который посвящен схемным решениям, а также методам и критериям оптимизации ИСКЦ станций, разработать технологию ГТ, которая должна объединить возможности КСЭ технологии и технологии ПГУ-КУ; технология ГТ ориентирована на реализацию в климатических условиях южного Египта; установки, реализующие

эту технологию, предназначены для решения задачи теплоснабжения потребителя и производства электроэнергии.

2. Предложить ряд теплосиловых схем для ИСКЦ установок, которые можно рекомендовать для реализации технологии ГТ в климатических условиях южного Египта; эти установки дадут возможность решить задачи: 1) теплоснабжения потребителя, 2) обеспечения максимальной ежедневной выработки электроэнергии по сравнению выработкой электроэнергии, которая является характерной для эталонной ПГУ – КУ; указанные конфигурации установок должны обеспечить: а) снижение потребления топлива, б) уменьшение количества выбросов углекислого газа.

3. Создать термодинамические математические модели (MM), которые должны отражать поведение тепловой эффективности, η_{искц}, и других критериев (N_{искц}, ΔN_{сол}, η_{сол,изл}...), относящихся к исследуемым циклам; эти циклы реализуются в ИСКЦ системах при заданных условиях эксплуатации, включая климатические условия Египта.

4. Разработать компьютерные коды для выполнить теплофизических (ТФ) расчетов, в том числе а) для вычисления критериев ($\eta_{искц}$, $N_{искц}$, ΔN_{con} , $\eta_{con,u3n}$...) применительно к рекомендуемым ИСКЦ установкам в заданных граничных условиях, включая условия Египта, б) для исследования влияния интеграции ТСР на характеристики эталонной ПГУ–КУ.

5. Разработать математическую модель (МВ) для взаимосогласованного определения: а) теплотехнических характеристик ИСКЦ установки, б) данных по расходу топлива, в) данных по выбросам углекислого газа, г) среднегодовой стоимости электроэнергии (LEC).

6. Создать компьютерные коды для выполнения ТФ расчетов на основе модели MB, в том числе для вычисления параметров ПЩК, параметров коллекторов, размеров солнечного поля, расхода топлива, количества выбросов углекислого газа, г) среднегодовой стоимости, LEC.

7. Для рекомендуемых ИСКЦ установок выполнить ТФ расчеты и получить численную информацию, в том числе: а) данные о критериях ($\eta_{искц}$, $N_{искц}$, $\Delta N_{сол}$, $\eta_{сол,изл}$...), б) данные о теплотехнических характеристиках, в) данные по расходу топлива, г) данные по выбросам углекислого газа, д) данные о стоимости электроэнергии, LEC; эти ТФ расчеты должны охватывать несколько режимов эксплуатации указанных установок в условиях Египта.

Объекты исследования

К объектам исследования диссертации относится группа технологий, включая технологию ГТ, которая объединяет технологию ПГУ-КУ и технологию производства электроэнергии на основе КСЭ; как объекты исследования также рассматриваются:

1) теплосиловые схемы, которые связаны с ИСКЦ установками,

2) термодинамические математические модели, описывающие поведение теплового КПД, $\eta_{искц}$, и других критериев ($N_{искц}$, $\Delta N_{сол}$, $\eta_{сол,изл}$...), относящихся к исследуемым циклам;

3) технология формирования открытых интерактивных кодов; эта технология дает возможность привлечь такие инструменты, которые соответствуют мировому уровню IT (инструмент «Mathcad Calculation Server», пакет «Microsoft Expression Web 3», пакет Mathcad, пакет Excel), и создать современное ПО для выполнение $T\Phi$ расчетов в Интернете применительно к ИСКЦ установкам,

4) модели MB, которые позволяют взаимосогласовано вычислять: а) теплотехнические характеристики ИСКЦ установок, б) данных по расходу топлива, в) данных по выбросам углекислого газа, г) стоимость электроэнергии, LEC.

Научная новизна работы

Новизна настоящего исследования состоит в том, что нами впервые получены следующие наиболее важные результаты, представляемые на защиту. 1. Предложена технология ГТ, которая объединяет возможности КСЭ технологии и технологии ПГУ-КУ; технология ГТ ориентирована на реализацию в климатических условиях южного Египта; ИСКЦ установки, реализующие эту технологию, предназначены для решения задачи теплоснабжения потребителя и производства электроэнергии.

2. Разработаны подробные модели ММ для исследования термодинамического воздействия ТСР, которая вводится в ПГУ- КУ, на термический КПД и критерии (N_{искц}, ΔN_{сол}, η_{сол,изл}...), относящиеся ИСКЦ установке; модели ММ ориентированы на выполнение ТФ расчетов, по которым оценивается эффективность рекомендуемых комбинированных (РК) установок при различных параметрических, схемных и климатических факторах.

3. Создана модель МВ, которая позволила получить взаимосогласованные численные данные о ряде разнородных характеристик ИСКЦ установок, в том числе:

а) данные по расходу топлива,

б) данные по выбросам углекислого газа,

в) данные о среднегодовой стоимости электроэнергии, LEC,

г) теплотехнические характеристики, включая параметры ПЦК и параметры коллекторов.

4. Предложена технология формирования открытых интерактивных Mathcad кодов; эта технология дает возможность привлечь такие инструменты, которые соответствуют мировому уровню *IT* (инструмент *«Mathcad Calculation Server»*, пакет *«Microsoft Expression Web* 3», пакет *Mathcad*, пакет *Excel*), и создать современное ПО для выполнение $T\Phi$ расчетов в Интернете применительно к ИСКЦ установкам.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость полученных результатов состоит, во-первых, в разработке технологии ГТ, которая объединяет возможности КСЭ технологии и технологии ПГУ-КУ; эта технология предназначена для реализации в климатических условиях южного Египта.

Во-вторых, в развитии методов, которые следует применять для исследования и оптимизации комбинированных термодинамических циклов; указанные методы позволили привлечь современные достижения вычислительной техники и инструменты IT (Интернет технология) в актуальные ТФ расчеты, которые нацелены на получение высокой эффективности ИСКЦ установок, исследуемых в диссертации.

В-третьих, определенный теоретический интерес представляет технология формирования открытых интерактивных Mathcad кодов; благодаря этой технологии пользователь получил возможность использовать инструменты («Mathcad Calculation Server», пакет «Microsoft Expression Web 3» и др.), которые соответствуют мировому уровню IT и позволяют выполнять ТФ расчетов в Интернете применительно к ИСКЦ установкам.

Практическая значимость работы

Практическая значимость проведенного исследования определяется возможностью использования полученных результатов и рекомендаций, во – первых, на этапах проектирования новых ИСКЦ установок. Во – вторых, рекомендации, приведенные в диссертации, представляют интерес для специалистов, которые ведут модернизацию действующих энергоустановок (ПГУ и др.), заняты поиском перспективных теплосиловых схем, использующих КСЭ, а также делают ТФ расчеты применительно к ИСКЦ установкам.

В – третьих, разработанное ПО, которое имеет форму открытых интерактивных Mathcad кодов, размещенных на удаленном сервере, представляет интерес для специалистов, связанных с проектированием перспективных ИСКЦ установок на этапе предпроектных исследований, а также для студентов и аспирантов теплотехнических специальностей, включая 05.04.12, 05.14.01, 05.14.03 и 05.14.14 в учебном процессе.

В четвертых, внедрение ИСКЦ установок, рассмотренных в диссертации, позволит существенно снизить себестоимость продукции и получить экономию топлива на данных установках в природных условиях Египта.

Методы исследования

В диссертации применяются методы термодинамики, теоретические основы теплотехники и достижения математического моделирования. Проверка адекватности теоретически полученных результатов производится: а) путём сравнения указанных результатов с соответствующими данными, приведенными в литературе, б) путём сравнения указанных результатов с соответствующими данными, вычисленными с помощью программного обеспечения (ПО) в виде *Thermoflow и Mathcad /Simulink*.

Степень достоверности результатов

При формировании технологии ГТ, в которой объединены возможности технологии КСЭ и возможности технологии ПГУ-КУ, был использован детальный сравнительный анализ: а) известных схемных решений, б) методов и критериев оптимизации ИСКЦ станций,

Разработанные термодинамические модели ММ и полученные на их основе численные результаты имеют высокую степень достоверности, поскольку в диссертации, вопервых, широко применяются сертифицированные программные продукты мирового уровня.

Во-вторых, в теплофизических расчетах, с помощью которых определяется информация, в том числе численные данные о критериях (N_{искц}, η_{искц}, ΔN_{сол}, . η_{сол,изл}..) для ИСКЦ установки, используются физические формулы из надежных литературных источников. В эти расчетах сделана проверка моделей на выполнение условий энергетического баланса.

В-третьих, сделаны тесты, в которых сравниваются результаты, полученные на основе моделей ММ и Mathcad кодов, разработанных в диссертации, с соответствующими результатами, которые дает программная модель Thermo-Flex (кампания Thermo-flow).

Положения, выносимые на защиту

- Технология ГТ, в которой объединены возможности технологии КСЭ и возможности технологии ПГУ-КУ и которая может реализоваться с помощью рекомендуемых ИСКЦ станций,

– Новые результаты исследований, выполненных с помощью моделей ММ для РК установок; эти результаты включают численные данные, которые показывают, что ИСКЦ станции позволяют получить лучшие факторы и критерии (N_{искц}, η_{искц}, ΔN_{сол},, η_{сол,изл} и др.) по сравнению с характеристиками, которые относятся к традиционной ПГУ.

– Открытые интерактивные Mathcad коды, которые опираются на термодинамические модели MM, являются компонентами ПО и дают возможность выполнять ТФ расчеты применительно к ИСКЦ установкам, в том числе вычислять критерии ($N_{искц}$, $\eta_{искц}$, ΔN_{con} , $\eta_{con,изл}$, $\eta_{con,изл}$ и др.). Эти коды размещены на удаленном сервере позволяют проектировщикам изменять входные данные в соответствии с выбранным видом дизайна ИСКЦ установки и условиями ее эксплуатации.

– Модель ТВ, которая позволяет для ИСКЦ станции, во-первых, определять теплотехнические характеристики (параметры ПЦК, параметры коллекторов, размеры солнечного поля); во-вторых, для РК установок.

Апробация результатов

Апробация работы была выполнена в форме докладов на следующих конференциях:

– XXIII-XXIV Международных научно-технических конференциях «Радио-электроника, электротехника и энергетика» МЭИ, Москва, 2018-2019 г.г.;

– 17th Conference of Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Mechanics, Pilsen, Czech Republic, 13-14 June 2018 г.

– Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность-основа развития энергетики Узбекистана». 21-22 декабря 2018 г.

Публикации

Публикации по теме диссертации представлены 10 печатными работами, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ (две из этих статей опубликованы в журнале «Энергосбережение и водоподготовка» и один в журнале «ИВУЗ. Проблемы энергетики»). Имеются 4 статьи, которые входят в перечень изданий, индексируемых в базе Scopus (среди этих статей 3 статьи опубликованы в журнале «Science direct» и 1 статья напечатана в журнале «AIP Publishing»).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 95 источников. Работа изложена на 218 страницах текста; она содержит 105 рисунков, 21 таблицу и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

<u>Во введении</u> обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и объекты исследования.

В первой главе представлен обзор, который касается: а) электроэнергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками в мире, б) энергосистем и технологических приложений, использующих ТСР, в) географического положения и природноклиматические условий Египта. Также применительно к Египту дан анализ, во-первых, современного состояние энергетики, во-вторых, спроса на электроэнергию и, в-третьих, возможности применения РК установок.

Во вторая главе приводятся объекты (КСЭ, СТЭС, ИСКЦ и др.), исследуемые в диссертации, вводятся критерии ($N_{искц}$, $\eta_{искц}$, $\Delta N_{сол}$, $\eta_{сол,изл}$ и др.) применительно к РК установкам, а также рассматриваются компоненты и агрегаты, входящие в эти установки. Рассмотрена технология ГТ, которая объединяет технологию КСЭ и технологию ПГУ-КУ. Показано, что эта технология может быть реализована с помощью ИСКЦ станции. Проведен обзор структур/конфигураций, которые можно использовать в ИСКЦ станциях и СТЭС, включая предложенную новую структуру ИСКЦ. Отмечены преимущества и недостатки РК установок. Сделан анализ моделей ММ, а также рассмотрены: а) известные подходы, используемые в термодинамическом моделирования критериев ($N_{искц}$, $\eta_{искц}$, $\Delta N_{сол}$, $\eta_{сол,изл}$ и др.), б) ПО, используемое в ТФ расчетах применительно к ИСКЦ установкам.

В третьей главе содержится подробное описание теплосиловой схемы разрабатываемой ИСКЦ электростанции; показана работа блоков, которые включены в данную схему, в том числе рассмотрены функции блока ПГУ – КУ, ПЦК и солнечного поля; представлены основные технические данные и проектные характеристики указанной теплосиловой схемы. Дается аналитическое описание термодинамического цикла, а также рабочих процессов, относящихся к РК установке. Приводится расчет энергетических и оптических характеристик параболоцилиндрических концентраторов, которые включены в солнечные коллекторы. Сформулированы: а) метод расчета оптического КПД системы «концентратор и приемник» и б) метод расчета коэффициента концентрации с использованием баланса лучистых потоков.

Конфигурация ИСКЦ системы

В диссертации исследуются пять рекомендуемых комбинированных установок, методической основой которых являются пять конфигураций ИСКЦ. Имеется установка, которая названа как «эталонная установка» и которая включает ряд блоков, в том числе: ПГУ – КУ, содержащую три контура с заданными давлениями, блок промежуточного перегрева пара и деаэратор (рис. 1). Ряд теплотехнических и конструктивных параметров этой установки даны в табл. 1.

Солнечное поле

В данном исследовании в соответствии с ГТ технологией эталонная ПГУ может подключаться к солнечному полю в заданных граничных условиях. Так, на рис. 2 приведена конфигурация ИСКЦ-1 установки, в котором используется солнечный блок, отвечающий граничным условиям: а) по температурам в характерных точках теплообменника (термальное масло нагревается до температуры 400 °C), б) по расходам воды (расход воды, D_{сп}, поступающей при 105 °C и др.), в) по точкам подключения к блоку КУ.

Применительно к технологии ГТ была выбрана следующая компоновка солнечного поля, в котором используется теплоноситель (TH) (термальное масло «Therminol VP-1»): ПЦК, расширительный бак и насос. Солнечное поле состоит из 48 петель; в поле имеются коллекторы (LS-3), которые включают по шесть петель и ориентированы по линии Север-Юг, при этом имеется система регулирования, которая позволяет отслеживать солнце при движении с Востока на Запад. Некоторые численные данные о характеристиках солнечного блока, исследованного в диссертации, приведены в табл. 1, эти результаты учитывают граничные условия Египта. Рабочий интервал для Therminol VP-1 составляет (12 ..., 400) °С. Номинальный массовый расход TH через коллекторный контур регулируется таким образом, чтобы иметь постоянное приращение температуры TH (от 291 °C на входе в коллекторный контур до 393 °C на выходе из коллекторного контура).

Окружающие условия	ЧНД темпер. пара на входе, °С	154	
Температура, °С	25	Изоэнтропический КПД ПТ, %	90
Давление, бар	1,013	КПД насоса, %	82
Газотурбинная установка		Механический КПД ПТ, %	99,8
Температура на входе, °С	1300	Мощность ПТУ, МВт	182,68
Температура на выходе, °С	650	КПД электрогенератора ПТУ, %	38,4
Расход воздуха, кг/с	735	Котел утилизатор	
Расход топлива, кг/с	17,157	Температура на выходе из конде- нсатора, °С	60
Повышение давления в компрессоре	16	Давление питательной воды, бар	1,2
Низшая теплота сгорания топлива (Метан), МДж/кг	50,056	Температура питательной воды, °С	105
Изоэнтропический КПД компрессора, %	88,2	Температура газа на входе в дымовую трубу, °С	90,13
Изоэнтропический КПД ГТ, %	88,4	Солнечное поле	
КПД камеры сгорания, %	99,7	Система ПЦК (LS-3)	
Механический КПД ГТУ, %	99,9	Местоположение	Асуан/ Египет
КПД электрогенератора ГТУ, %	99,9	Климатическая зона	жарко, пустыня
Мощность ГТУ, МВт	320,91	Широта расположения, град.	24
Электрический КПД ГТУ, %	37,47	Высота над уровнем моря, м	300
Паротурбинная установка		Площадь солнечного поля, м ²	164229
ЧВД давления пара на входе, бар	121,12	ТН температура на входе, °С	291
ЧВД температура пара на входе, °С	560	ТН температура на выходе, °С	393
ЧСД давления пара на входе, бар	30,8	Парогазовая установка	
ЧСД температура пара на входе, °С	560	Мощность ПГУ, МВт	503,59
ЧНД давления пара на входе, бар	1,1	КПД ПГУ, %	58,81

Таблица 1. Технические данные ПГУ - КУ и солнечного поля при номинальных условиях

Режимы работы ИСКЦ систем

Разрабатываемую ГТ технологию можно реализовать с помощью ИСКЦ установок (рис. 2 – 6), при этом используют ряд процессов, которые определяют режим работы ИСКЦ системы. Среди них процесс передачи теплоты воде/пару от выхлопных газов,

которые поступают из блока ПГУ в блок КУ. Полученный пар совершает работу в паровой турбине. В рассматриваемом термодинамическом цикле теплота, собранная солнечным полем, используется для генерации дополнительного количества пара в блоке СПГ. Дополнительный пар подается в блок КУ и дает возможность реализовать: 1) режим повышения мощности и 2) режим экономии топлива.

В режиме повышения мощности конфигурация тепловой схемы обеспечивает увеличение расхода генерируемого пара (в периоды солнечной активности часть питательной воды из КУ (рис. 2..6) направляется в СПГ. Благодаря этому эффекту увеличивается мощность на выходе РК установки.

В периоды низкой солнечной активности (облачность, ночной период) ИСКЦ установка работает как классический цикл ПГУ-КУ. Конфигурации РК установок показаны на рис. 2-6; некоторые характеристики процессов, реализующихся в исследованных циклах, даны ниже.



Рис. 1. Эталонная комбинированная установка ПГУ- КУ трех контурных давлений

Рис. 2. Принципиальная схема предлагаемого ИСКЦ-1

ГТУ – газотурбинная установка; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания; ПТУ – паротурбинная установка; КУ –котел-утилизатор; ЧВД, ЧСД, ЧНД – часть высокого, среднего, и низкого давлений; Г – электрогенератор; ПП – промежуточный пароперегреватель; И – испаритель; ПЕ – перегреватель; Э – экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ВД, СД, НД – высокое, среднее и низкое давление; КН – конденсатный насос; Д – деаэратор; ПН – питательный насос; НРК – насос рециркуляции конденсата; СМ – смеситель; Б – барабан; СП – солнечное поле; СПН – солнечный полевой насос; СПГ – солнечный парогенератор; СПП – солнечный пароперегреватель; СПН – солнечный парогенератор; СПП – солнечный бак; D_{тн сп} – массовый расход Генерируемого солнечного пара.

ИСКЦ-1: как показано на рис. 2, в солнечное время термальное масло нагревается в солнечном поле до температуры около 400 °С, далее масло направляется в ряд кожухотрубных теплообменников (СПГ). Часть питательной воды (D_{cn}), поступающей в ЭВД-I/СД при 105 °С, испаряется и перегревается в СПГ до 331 °С (рис. 2). Поток (D_{cd} , D_{Bd}) перегревается в контуре СД и контуре ВД. Массовый расход перегретого пара, генерируемого в СПГ (D_{cn}), зависит от ТСР, поступившей на солнечное поле. Массовый расход генерируемого пара увеличивается с увеличением прямого нормального излучения (ПНО «DNI»). Перегретый пар, поступающий из СПГ и ПЕ_СД (D_{cd}), смешивают с выходным паром из ЧВД (D_{Bd} + D_{cd} + D_{cn}), далее дополнительно перегревают в блоке ПП до 560 °С в КУ, а затем вводят в ЧСД. Подвод солнечного тепла обеспечивает заметное увеличение массового расхода пара, поступающего в ЧСД, по сравнению расходом пара в эталонной

ПГУ, что приводит к увеличению выходной мощности блока ПТУ. Поскольку накопление ТСР в предлагаемой системе не предусматривается, ИСКЦ-1 станция работает ночью в режиме комбинированного цикла.

ИСКЦ-2: как показано на рис. 3, фракция питательной воды извлекается из деаэратора при 105 °С и перекачивается в СПГ, где предварительно нагревается и выпаривается до 331 °C. Насыщенный пар, выходящий из СПГ (D_{сп}), смешивается с насыщенным паром, поступающим в ПЕ ВД (D_{вд}), а затем смесь (D_{вд}+D_{сп}) перегревается до 560 °С в ПЕ ВД выхлопными газами газовой турбины, а затем расширяется в ЧВД.

ИСКЦ-3: в соответствии с блок-схемой ИСКЦ-3, показанной на рис. 4, СПГ получает часть предварительно нагретой питательной воды (пар) (D_{cn}) из Э ВД/СД в КУ при 243,5 °С и возвращает перегретый пар при 378 °С; этот пар смешивается с паром СД (D_{сд}), выходящим из контура ПЕ СД, и паром, выходящим из ЧВД (D_{вд}). Смесь (D_{вд} + D_{сд} + D_{сл}) повторно нагревается в ПП до 560 °С (температура на входе ЧСД паровой турбины).



Рис. 3. Принципиальная схема предлагаемого ИСКЦ-2



СП CIT СПН $D_{BR} + D_{CR} + D_{HR} + D_{CR} - D_{R}$ СПН HPK БНЛ гту DE OT CITCDer $D_{BR} + D_{CR} + D_{HR} + D_{CR} - D_{R}$ ЧВД LOF чнл $D_{\text{bg}} + D_{\text{cg}} + D_{\text{c}}$ IIIN

КемнаПП ВХ (Дет)

СПП

Рис. 4. Принципиальная схема предлагаемого ИСКЦ-3



Рис. 5. Принципиальная схема предлагаемого ИСКШ-4

¹пу

Рис. 6. Принципиальная схема предлагаемого ИСКЦ-5

ИСКЦ-4: как показано на рис. 5, в этой установке применена интеграции с применением контура среднего давления (СД интеграция), когда часть генерируемого пара (D_{сп}), выходящая из Э ВД II при 240 °С, направляется в СПГ для перегрева до приблизительно

376 °С за пределами КУ. Часть пара (D_{Bd}) испаряется в КУ. Перегретый пар из СПГ (D_{cn}) возвращается обратно в КУ, где он смешивается с паром высокого давления, выходящим из контура И_ВД (D_{Bd}). Смесь двух потоков ($D_{Bd}+D_{cn}$) затем перегревается в ПЕ_ВД примерно до 560 °С и затем поступает в ЧВД.

ИСКЦ-5: как показано на рис. 6, во время восхода солнца часть пара из Э_ВД_II (D_{cn}) при 326 °С выходит из КУ и попадает в СПГ, где испаряется и перегревается. Вырабатываемый солнечный пар возвращается обратно в КУ при 376 °С и смешивается с насыщенным паром из И_ВД (D_{вд}). Паровая смесь (D_{вд}+D_{cn}) перегревается в ПЕ_ВД до 560 °С и расширяется в ЧВД.

Анализ эффективности ИСКЦ станции

Как наиболее важные для РК установок выбраны критерии (N_{искц}, η_{искц}, ΔN_{сол}, и др.) и следующие формулы

$$N_{\text{искц}} = N_{\text{гту}} + N_{\text{пту}_{\text{искц}}}, \qquad (1)$$

$$\eta_{\mu c \kappa u} = \frac{N_{\mu c \kappa u}}{Q_{1_{nry}} + Q_{con, ten}},$$
(2)

где N_{гту} – электрическая мощность ГТУ (МВт), N_{пту_искц} – электрическая мощность ПТУ (МВт), которая работает в режиме ИСКЦ системы, N_{искц} – полная электрическая мощность ИСКЦ установки, $Q_{1_{nry}}$ – тепловая мощность, подведенная в ПГУ, МВт, $Q_{\text{сол,теп}}$ – полученная солнечная тепловая мощность, МВт, $\eta_{искц}$ – тепловой КПД ИСКЦ установки.

Критерий, ΔN_{con} , определяется по формуле

$$\Delta N_{\rm con} = N_{\rm nty_ucku} - N_{\rm nty}, \tag{3}$$

где N_{пту} – электрическая мощность (МВт) блока ПТУ, который входит ПГУ-КУ.

Для оценки эффективности преобразования теплоты TCP в ИСКЦ установке привлекается ряд критериев, в том числе:

 а) коэффициент конверсии, η_{сол,изл}, который относится к полной тепловой мощности, поступающей от солнечного ресурса, в форме

$$\eta_{\text{сол, изл}} = \frac{\Delta N_{\text{сол}}}{Q_{\text{полн, сп}}} = \frac{\Delta N_{\text{сол}}}{DNI \cdot A_{\text{сп}}},$$
(4)

б) коэффициент конверсии, $\eta_{con, ten}$, который относится к полученной тепловой мощности от солнечного ресурса, в форме

$$\eta_{\text{сол,теп}} = \frac{\Delta N_{\text{сол}}}{Q_{\text{сол,теп}}},$$
(5)

в) солнечная доля мощности, SF, которая связана солнечным ресурсом, в форме

$$SF = \frac{\Delta N_{con}}{N_{\mu c \kappa \mu}},\tag{6}$$

где Q_{полн,сп}– мгновенная полная мощность, относящаяся к солнечному ресурсу, MBT; DNI – прямое нормальное облучение, BT/м², A_{сп} – площадь солнечного поля, м².

Для оценки электрического КПД, $\eta_{3-пгу, coл}$, который относится к ИСКЦ станции, выбрана формула

$$\eta_{\mathfrak{S}-\Pi\Gamma \mathcal{Y},\text{COJ}} = \frac{N_{\mu C \kappa \mathfrak{U}}}{Q_{1_\Pi\Gamma \mathcal{Y}}}.$$
(7)

Представленные формулы были использованы при разработке моделей ММ и запрограммированы в открытых интерактивных Mathcad кодах. Указанные Mathcad коды размещены как ПО на удаленном сервере в виде Интернет ресурса, который имеет URL адрес *http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/VV-16-IPE-RH-3.xmcd*.

<u>В четвертой главе</u> представлен ряд результатов, в том числе: а) численные данные, которые получены в ТФ расчетах с применением ПО в форме открытых интерактивных Mathcad кодов; б) ряд критериев ($N_{искц}$, $\eta_{искц}$, ΔN_{con} и др.) для РК установок; в) результаты экономического анализа и оценка экологической безопасности использования указанных ИСКЦ систем; г) сопоставление новых данных с результатами, которые имеются в литературе.

С помощью указанных ТФ расчетов исследованы пять конфигураций теплосиловой схемы и получена информация о главных стратегиях интеграции, а именно:1) две стратегии интеграции с применением контура среднего давления (СД интеграция) для установок (ИСКЦ-1 (рис.2), ИСКЦ -3 (рис. 4)), 2) три стратегии интеграции на контуре высокого давления (ВД интеграция) для установок (ИСКЦ -2 (рис. 3), ИСКЦ -4 (рис. 5) и ИСКЦ -5 (рис. 6)).

В ТФ расчетах применяются сходные модели ММ и упомянутое ПО, при этом выполняется учет условий эксплуатации и ведется сравнение новых численных данных с соответствующими критериями, которые относятся к эталонной ПГУ- КУ (рис. 1). Нами показано, что погодные условия и солнечная радиация оказывают значительное влияние на критерии РК установок, ТФ расчеты энергопроизводительности ИСКЦ системы проводились с использованием почасового графика, который относится к данному месту (г. Асуан, Египет, широта 24° и высота равна 300 м над уровнем моря) с умеренным солнечным излучением.

Почасовые значения прямого нормального облучения в этом месте рассчитываются с использованием модели ММ (Термофлекс (Thermoflow)@модель) и являются действительными для локальной базы данных метеорологического года. Результаты ТФ расчетов для РК установок получены, во-первых, в рамках четырех репрезентативных дней (солнечный день четырех сезонов года: день с высокой солнечной радиацией (22 июня), два дня с умеренно солнечной радиацией (23 марта и 20 сентября) и день со слабой солнечной радиацией, 21 декабря).

Во-вторых, результаты ТФ расчетов представляют собой сравнительные данные о критериях, который определены для РК установок на основе оценок, отражающих ежегодные значения критериев (N_{искц}, $\eta_{искц}$, ΔN_{con} , и др.) применительно к РК установкам. Сделаны оценки влияния интеграции ТСР на электрический КПД, $\eta_{3-пгv.con}$.

Чистая выходная электрическая мощность предлагаемых ИСКЦ станций

ТФ расчеты позволили определить ряд критериев как зависимости от времени суток, месяца и года. Так, получены значения ($Q_{\text{сол,теп}}$, $N_{\text{искц}}$) (рис. 7-10) для ИСКЦ электростанций для группы дней. Можно видеть, что эти системы могут работать с подводом солнечного тепла в течение: а) 12,5 часов 22 июня, б) 11 часов в марте и в сентябре, в) 10 часов 21 декабря.

Впервые получены сравнительные данные о критериях (Q_{сол,теп}, N_{искц}, η_{э-пгу,сол} и др.) для отобранных систем. Летом (рис. 7) солнечная радиация выше, поэтому солнечное поле обладает высокой эффективностью. Распределение (рис. 7-10) показывает, что солнечное поле собирает большую часть общего падающего солнечного излучения в определенной окрестности 12 часов, когда Солнце приближается к зениту. Например, электрическая мощность, N_{искц}, составляет более 110 МВт при использовании TH в форме термального масла. В указанном временном интервале: а) значительно увеличивается выработка электроэнергии в паровом цикле из-за увеличения выработки пара (D_{сп}) в

солнечном парогенераторе (СПГ), б) существенно возрастает чистая выходная мощность ИСКЦ системы. Из рисунка 7 видно, что критерий, $N_{искц}$, достигает $N_{искц} = (541,18,545,86,547,75,556,53,558,62)$ МВт для ИСКЦ-1, 2, 3, 4, 5 соответственно из-за использования солнечной интеграции, при этом для эталонного ПГУ- КУ электрическая мощность составляет 503,59 МВт. Весной и осенью (рис. 8 и 9) солнечное излучение уменьшается, поэтому $Q_{сол, ren}$ может достигать 92,837 МВт и 94,346 МВт соответственно. В результате получены значения $N_{искц} = (535,21,539,04,540,36,547,36,549,79)$ МВт для ИСКЦ-1, 2,3,4,5 соответственно весной и $N_{искц} = (535,71,539,61,540,95,548,05,550,53)$ МВт осенью; можно сделать выводы: а) процесс интеграции при более высокой температуре и давлении (ИСКЦ-5, 4, 2) вырабатывает большую мощность, чем при среднем давлении (ИСКЦ-1,3), б) больший массовый расход пара в паровом цикле является причиной увеличения $N_{искц}$ при одинаковом подводе солнечного тепла.



Рис. /. Вариации Q_{сол,теп} и N_{искц} по пяти циклам на 22 июня в почасовом исчислении

Рис. 8. Вариации Q_{сол,теп} и N_{искц} по пяти циклам на 23 марта в почасовом исчислении



Рис. 9. Вариации Q_{сол,теп} и N_{искц} по пяти циклам на 20 сентября в почасовом исчислении

Рис. 10. Вариации Q_{сол,теп} и N_{искц} по пяти циклам на 21 декабря в почасовом исчислении

Зимой в течение дня солнечный зенитный угол велик, поэтому: 1) эффективность солнечного поля резко снижается из-за косинусэффекта угла падения солнечного излучения, слабого солнечного излучения и низких температур окружающей среды, 2) значительно снижается полезная выходная мощность системы (рис. 10). Собранная

тепловая мощность, Q_{сол,теп}, для солнечного поля уменьшается до 50,7 МВт. В результате в СПГ генерируется меньше пара при ВД интеграции и СД интеграции; этот эффект объясняет низкую мощность, N_{искц}, установок (максимальное значение N_{искц} составляет: а) 529,02 МВт для ИСКЦ-5, б) 527,69 МВт для ИСКЦ-4, в) 523,87 МВт для ИСКЦ-3, г) 522,9 МВт по ИСКЦ-2 и д) минимальное значение 521,06 МВт для ИСКЦ-1 в середине дня). В целом следует отметить, что поступление ТСР увеличивает мощность паровой турбины в ИСКЦ системе по сравнению с мощностью эталонной ПГУ - КУ.

Влияние солнечного тепловыделения на производительность предлагаемых ИСКЦ станций

Влияние критерия, $Q_{con,ren}$, на КПД, $\eta_{3-пгу,con}$, показано на рис. 11. Очевидно, что КПД, $\eta_{3-пгу,con}$, установки сильно зависит от ТСР. Он может достигать 64,65% в случае ВД интеграции, которая реализована в первой группе станций (ИСКЦ-2, ИСКЦ-4 и ИСКЦ-5), когда $Q_{con,ren} = 100$ МВт. СД интеграция реализована во второй группе станций (ИСКЦ-1, ИСКЦ-3), она дает максимумы, $\eta_{3-пгу,con} = (62,8\%, 63,45\%)$.

При $Q_{con,ren} = 0$ МВт ИСКЦ установки работают как обычные ПГУ, таким образом, выходная мощность, ΔN_{con} , солнечной энергии составляет $\Delta N_{con} = 0$ МВт и $\eta_{3-пгу,con} = \eta_{3-пгy} = 58,81\%$, Причина этого обсуждалась выше: когда увеличивается подвод солнечного тепла, масса насыщенного пара в СПГ также увеличивается, это приведет к генерации большего количества пара (до 70 кг/с) в цикле Ренкина, следовательно, будет увеличиваться выходная мощность. Так, выходная мощность в ИСКЦ-5 может достичь $N_{искц} = 554$ МВт. На рис. 12 показано влияние критерия, $Q_{con,ren}$, на массовый расход солнечного пара во всех циклах. Сделан вывод, что скорость потока солнечного пара, генерируемого в КУ, постепенно увеличивается с увеличением $Q_{con,ren}$. При малом количестве солнечного тепла генерируемый поток пара является относительно низким для всех циклов ($D_{cn} = 3,8 - 7$ кг/с при $Q_{con,ren} = 10$ МВт). При $Q_{con,ren} = 100$ МВт масса генерируемого пара достигает 70 кг/с в ИСКЦ-5 по сравнению с 38,4 кг/с в ИСКЦ-1, что связано с различием в температурах подачи пара в СПГ.



Аналогично на рис. 13 показано влияние $Q_{\text{сол,теп}}$ на критерий, $N_{\text{искц}}$. Анализ показывает, что $N_{\text{искц}}$ зависит существенно от $Q_{\text{сол,теп}}$. При $Q_{\text{сол,теп}} = 0$ МВт ИСКЦ установки работают как обычные ПГУ, таким образом, выходная мощность составляет $N_{\text{искц}} = N_{\text{пгу}} =$

503,59 МВт. Когда солнечная энергия увеличивает выходную мощность, то она может достичь максимума $N_{\text{нскц}} = (553,5, 551,46, 541,92)$ МВт в процессе интеграции высокого давления (ИСКЦ-5,4,2) с увеличением ($\Delta N_{\text{сол}} = (49,93, 47,87, 38,33)$ МВт соответственно) при $Q_{\text{сол,теп}} = 100$ МВт. И изменяется от 537,74 МВт до 543,5 МВт при интеграции СД (ИСКЦ-1,3) с увеличением ($\Delta N_{\text{сол}} = (34,15, 39,95)$ МВт соответственно). При $Q_{\text{сол,теп}} = 10$ МВт увеличение выходной мощности составляет ($\Delta N_{\text{сол}} = 3,5 - 5$ МВт для всех циклов). На рис. 14 показано, что доля, *SF*, солнечной энергии может достигать 10%, когда солнечная тепловая мощность в ИСКЦ-5 составляет $Q_{\text{сол,теп}} = 100$ МВт. Эта доля снижается до 6,8 % в ИСКЦ-1, а доли, *SF*, для других циклов находятся между ними. Сделан вывод: а) увеличение выходной мощности и теплового КПД установок при ВД интеграции (ИСКЦ-2,4,5) является существенным по сравнению с соответствующими критериями ($\Delta N_{\text{сол}}$, $\eta_{3-пгу,\text{сол}}$), которые реализуются в (ИСКЦ-1,3) установках, имеющих СД интеграцию, при высоком значении $Q_{\text{сол,теп}} = 10$ МВт.



Рис. 13. Влияние тепловой мощности на выходную мощность, N_{искц}.



Коэффициенты конверсии, η_{сол,теп}, η_{сол,изл}

Коэффициент, $\eta_{con,ren}$, показанный на рис. 15, достигает очень высоких значений, приближающихся к 50%. Наибольшее значение $\eta_{con,ren}$ (50,35%) получено с помощью ИСКЦ-5 установки, аналогичные коэффициенты составили 47,72% и 40,15% для ИСКЦ-4 установки и ИСКЦ-3 установки. ИСКЦ-1 дает самый низкое значение, $\eta_{con,ren}$ (34,62%) изза наименьшего среднего значения мощности - ΔN_{con} .

На рис. 16 показаны результаты ТФ расчета применительно к коэффициенту конверсии, $\eta_{con,u3n}$, для предложенных циклов. Очевидно, что $\eta_{con,u3n}$ достигает максимального значения 36,7% в ИСКЦ-5 в летние дни. Эти значения эффективности намного выше, чем критерий, $\eta_{con,u3n}$, для установок, работающих только на солнечной энергии. Сделан вывод о положительной синергии, которая выявлена при интеграции солнечного тепла в цикл ПГУ – КУ; найдены более высокие значения $\eta_{con,u3n}$ (они достигают $\eta_{con,u3n} = (35,29\%, 29,16\%, 28,18\%, 25,05)$ в ИСКЦ-4, 3, 2, 1 соответственно). В зимний сезон, когда солнечное поле имеет низкий КПД из-за сезонного угла падения солнечного света, коэффициент конверсии, $\eta_{con,u3n}$, понижается до 20,12%.





Рис. 16. Вариации η_{сол,изл} по пяти циклам на на 22 июня в почасовом исчислении

Новые численные данные о критериях ($Q_{con,ren}$, ΔN_{con}) в зависимости от времени представлены на рис. 17 для исследуемых ИСКЦ установок. Значения $Q_{con,ren}$ являются удовлетворительными в течение года, а также имеет высокие значения летом, весной и осенью (до 288 ГВт.ч/день в летний период года). Зимой значения $Q_{con,ren}$ лежат ниже, чем в другие месяцы с более облачными периодами, поэтому $Q_{con,ren}$ резко уменьшается зимой (до 157 ГВт.ч/день). В общем значения $Q_{con,ren}$ являются достаточно большими, чтобы получить высокую температуру на выходе из ПЦК и генерировать большее количество «солнечного пара» в течение года. Важным результатом являются пиковые значения критерия, ΔN_{con} (пик составляет около 143,71 (ГВт.ч/день) для ИСКЦ-5; пики (136,8, 114,5, 109,22, 98,5 ГВт.ч/день) являются характерными для ИСКЦ-4,3,2,1 соответственно в летнее месяцы из-за высоких значений $\eta_{con,ren}$). Указанные критерии снижаются до 54,3 ГВ (т ч)/день зимой (рис. 17).



станций

Годовые результаты работы ИСКЦ систем

Чтобы получить полный обзор и оценить реальные преимущества ИСКЦ системы, были выполнены ТФ расчеты применительно к указанным ИСКЦ установкам, в том числе рассчитаны данные о ежегодной эффективности (рис.18 и табл. 2).

17

В первой конфигурации ИСКЦ-1 реализована СД интеграция. Одним из важных параметров является ежегодная доля солнечной энергии. В этом случае среднегодовое значение солнечной доли, *SF*, колеблется от 3,34% до 6,55% при выработке средней дополнительной мощности в диапазоне (16,72–33) МВт.

Годичные характеристики для изученных циклов показаны на рис.18 и в табл. 2.

Оценки стоимости электроэнергии и количества выбросов СО2

Совместная обработка разнородных данных (теплотехнические характеристики ИСКЦ установки, данные по расходу топлива, данные о количестве выбросов углекислого газа, данные о среднегодовой стоимости электроэнергии, LEC) является нетривиальной задачей. В диссертации предложена модель MB, которая позволила получить взаимосогласованные численные об указанных характеристиках. Так, часть результатов дана в табл. 2. Для рекомендуемых ИСКЦ установок была рассчитана экономическая характеристика в виде среднегодовой стоимости электроэнергии, LEC, которая зависит от общих инвестиционных затрат, затрат на эксплуатацию и др. Например, было принято, что удельные капитальные вложения в строительство солнечного поля ИСКЦ станции равны 1285 \$/кВт. Сделанные оценки показывают: достигнутое увеличение годовой доли Q_{сол,теп} солнечной энергии приводят, во-первых, к значительному снижению выбросов CO₂ (сокращение выбросов составляет 49419 т/г при ВД интеграции по сравнению с выбросами эталонной ПГУ – КУ). Во-вторых, снижается годовая стоимость электроэнергии (на 0,0482 \$/кВт·ч).



Рис. 18. Ежегодные значения критериев (Q_{сол,теп}, ΔN_{con} , *SF*) для предлагаемых ИСКЦ станций

Таблица 2.	Ежегодная	производите	льность	и резуль	таты экон	омического	анализа по
		предлага	емых И	СКЦ уста	ановок		

Парамотри	Типа ИСКЦ						
параметры		ИСКЦ-1	ИСКЦ-2	ИСКЦ-3	ИСКЦ-4	ИСКЦ-5	
Среднегодовое количество солнечного тепла, ГВтч	0	243,98	243,98	243,98	243,98	243,98	
Среднегодовое производство солнечной электроэнергии, ГВтч	0	84150	93726	98731	116314	122652	
Среднегодовая чистая выходная мощность системы, N _{искц} , ГВтч	1813	1897,4	1907	100544	1929,56	1935,9	
Среднегодовая солнечная доля, %	0	5,13	5,73	5,96	7.15	7,49	
Среднегодовая тепловой КПД, %	58,8	61,56	61,85	62,00	62,95	63,22	
Среднегодовая солнечная тепло к электрическая КПД, %	0	34,72	38,12	39,75	47,3	49,88	
Среднегодовая экономия топлива, т	0	10481,9	11674,7	12298	14488,4	15277,8	

Среднегодовые сокращения выбросов CO ₂ ,т	0	31921,2	35553,7	41039,3	45503,9	49419
Среднегодовая стоимость электроэнергии, LEC, \$/кВт.ч	0,04961	0,04863	0,04852	0,04847	0,04827	0,04819

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертации получен ряд результатов, по которым сделаны следующие выводы.

1. Разработана гибридная технологии, которая объединяет технологию КСЭ и технологию ПГУ-КУ и которая может быть реализована на основе ИСКЦ станций в климатических условиях южного Египта.

2. Предложено пять различных конфигураций ИСКЦ станций на основе нашего анализа известных технических решений. Исследованы преимущества, которые можно получить от внедрения ИСКЦ установки, если ее сравнивать с базовой ПГУ - КУ; эта информация ориентирована на административных руководителей, которые должны принимать решения о внедрении той или иной ИСКЦ установки в условиях Египта.

3. Термодинамические модели ММ позволили описать тепловую эффективность, $\eta_{искц}$, и другие критерии ($N_{искц}$, $\Delta N_{сол}$, $\eta_{сол,изл}$...), относящиеся к исследуемым циклам и учитывающие природные условия Египта.

4. Модель МВ дала возможность получить взаимосогласованные численные данные: а) о теплотехнических характеристик ИСКЦ установок, б) о расходе топлива, в) о количестве выбросов углекислого газа, г) о стоимости электроэнергии, LEC; эта информация получена с учитом условий Египта.

5. Для выполнения ТФ расчетов, которые опираются на указанные модели, было разработано ПО, имеющее форму открытых интерактивных Mathcad кодов. Указанные Mathcad коды размещены как Интернет ресурс (<u>http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/tdceng.html</u>; <u>http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/VV-16-IPE-RH-3.xmcd</u>). Используя это ПО, пользователь может, во-первых, выполнять оптимизационные расчеты применительно к ИСКЦ установкам, при этом вычисления ведутся в Интернете, во - вторых, во время ТФ расчета пользователь может варьировать входные данные, направляемые в открытый Mathcad код, в зависимости от проектных задач и эксплуатационных условий.

6. Результаты моделирования показали, что среднее значение теплоты, обусловленной критерием, Q_{сол,теп}, и произведенной в течение года, составляет 244 ГВт·ч, а эффективность солнечного поля достигает 66,85%. ВД интеграция, которая реализована в первой группе станций (ИСКЦ-2, ИСКЦ-4 и ИСКЦ-5), обеспечивает большую скорость потока пара в блоке КУ, если сравнивать данные, полученные для первой группы, с данными, полученными во втором варианте интеграции; СД интеграция реализована во второй группе станций (ИСКЦ-1, ИСКЦ-3). Чистая выходная мощность установки, относящейся к первой группе, может достигать 558,62 МВт в летний период. Мощность установки, относящейся ко второй группе, может составить 547,35 МВт. Оценки превышения мощности по сравнению с мощностью эталонной ПГУ-КУ составляют 57,74 МВт и 43,76 МВт соответственно. Эти значения уменьшаются в зимние дни из-за меньшей ТСР.

7. Максимальный коэффициент конверсии, $\eta_{\text{сол,теп}} = 50,3\%$ был достигнут с использованием ВД интеграции, при этом коэффициент конверсии, $\eta_{\text{сол,изл}}$, составил 36,7%; при использовании СД интеграции получены следующие значения критериев: $\eta_{\text{сол,теп}} = 40,3\%$ и $\eta_{\text{сол,изл}} = 29,3\%$; эти значения были подтверждены сравнением их с литературными данными.

8. Результаты показывают: по сравнению с эталонным случаем ИСКЦ станция способна увеличить солнечную долю мощности, *SF*, до 11% и увеличить критерий, $\eta_{искц}$, с 58,81% до 65,25% в случае ВД интеграции; для случая СД интеграции солнечная доля, *SF*, составляет около 8,7%, а критерий, $\eta_{искп}$, возрастает на 5,1%. 9. Численные данные моделирования показывают: а) при ежедневной работе ИСКЦ станции можно добиться увеличения выработки электроэнергии на 7,5% по сравнению с выработкой эталонной ПГУ, а среднегодовая эффективность ИСКЦ увеличивается с 58,81% до 63,22% при ВД интеграции, б) можно увеличить выработку электроэнергии на 5,13% и увеличить среднегодовую эффективность с 58,81% до 61,56% при СД интеграции, в) удается сократить выбросы CO_2 и получить экономию топлива, г) уровень стоимости электроэнергии, который определен для ИСКЦ станции, составляет LEC = 0,0482 \$/кВт·ч; эта оценка лежит ниже на 25%, чем стоимость электроэнергии, которая получена в аналогичных установках, описанных в литературе.

<u>Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:</u> публикации, индексированные в Scopus

1. Ashraf E. Elmohlawy, Boris. I. Kazandzhan, Valery F. Ochkov. Modeling and performance prediction of solar parabolic trough collector for hybrid thermal power generation plant under different weather conditions. AIP Conference Proceedings 2047, 020002 (2018).

2. Ashraf E. Elmohlawy, Valery F. Ochkov, Boris. I. Kazandzhan. Study and Analysis the Performance of Two Integrated Solar Combined Cycle // Energy Procedia. Vol. 156 (2019), pp. 79-84.

3. Ashraf E. Elmohlawy, Valery F. Ochkov, Boris I. Kazandzhan. Thermal performance analysis of a concentrated solar power system (CSP) integrated with natural gas combined cycle (NGCC) power plant. Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 14, September 2019.

4. Ashraf E. Elmohlawy, Valery F. Ochkov, Boris. I. Kazandzhan. Study and Prediction the Performance of an Integrated Solar Combined Cycle Power Plant // Energy Procedia. Vol. 156 (2019), pp. 72-78.

публикации в журналах, рекомендованных ВАК

5. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф. Общая оценка ситуации в энергетике и солнечной энергии в мире и Египте // Энергосбережение и водоподготовка. № 2. 2018. С. 19-30.

6. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. Оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 21, № 1-2 (2019). С. 43-54.

7. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф. Моделирование и прогнозирование солнечных параболических коллекторов гибридной тепловой электростанции // Энергосбережение и водоподготовка. № 4. 2018. С. 42-52.

публикации в трудах международных научно-технических конференций

8. А.Э. Эльмохлави, В.Ф. Очков. «Перспективы использования бинарных энергетических установок с солнечными элементами для условий Египта», Тезисы докладов 24-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиотехника, электротехника и энергетика", М.: Изд-во МЭИ, 2018 г.

9. А.Э. Эльмохлави, Б. И. Казанджан, В.Ф. Очков. Моделирование интегрированного солнечного комбинированного цикла в южном египте. Тезисы доклада на Международной научно технической конференции «Энергоэффективность – основа развития энергетики Узбекистана». 21-22 декабря 2018 г. Опубликовано в журнале «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». № 3-4, 2018 г. С. 307-312.

10. А.Э. Эльмохлави, В.Ф. Очков. «Термодинамическая оценка интегрированного солнечного комбинированного цикла с солнечным полем непрямого парообразования». Тезисы докладов 25-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика», М.: Изд-во МЭИ, 2019 г.