

EDN: UABPZP

УДК: 621.311.001.57

1.2.2

СИСТЕМЫ ТРИГЕНЕРАЦИИ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е.Г. Какушина, Б.А. Якимович, Н.М. Шайтор

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Российская Федерация, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Аннотация. В условиях глобального изменения климата и истощения традиционных энергетических ресурсов, использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) становится все более актуальным. В данной статье рассматривается разработка системы тригенерации, ориентированной на южные регионы России, с целью повышения энергоэффективности и снижения экологической нагрузки. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи используются современные методы моделирования, основанные на интегрированном подходе и потенциальные возможности применения систем тригенерации в южных регионах России с акцентом на использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Результаты исследования: предложен комплекс математических моделей тригенерации с использованием гибридных гелиоустановок для локальных энергосистем и разработана методика, позволяющая экспериментально подтвердить достоверность предложенного комплекса математических моделей тригенерации. Системы тригенерации могут быть реализованы различными способами, включая прямую генерацию тепла и электроэнергии, а также применение абсорбционных холодильных машин для получения холода. В статье рассматриваются наиболее актуальные технологические решения.

Ключевые слова: системы тригенерации, возобновляемые источники энергии, прямая генерация тепла и электроэнергии, абсорбционные холодильные машины.

Введение

Энергосистема России претерпевает значительные изменения, обусловленные технологическим прогрессом, экологическими требованиями, экономическими факторами и государственной политикой. Регионы страны демонстрируют разнородные тенденции в развитии генерации, транспорта и распределения электроэнергии, что связано с их географическими, климатическими и промышленными особенностями [1].

К ключевым можно отнести следующие тенденции: диверсификация энергобаланса (солнечная энергетика (наибольший потенциал – в южных регионах (Краснодарский край, Крым, Ставрополье, Астраханская область), ветроэнергетика (развивается в прибрежных и степных зонах (Ростовская область, Калмыкия, Архангельская область), малая гидроэнергетика (активно развивается в горных и речных регионах); использование низкоуглеродных источников (атомная энергетика, газификация); водородная энергетика; цифровизация и smart-технологии (внедрение интеллектуальных систем учета (АИС КУЭ) и цифровых подстанций, развитие микросетей (microgrid)); децентрализация энергосистем (рост числа распределенной генерации, развитие гибридных энергокомплексов (дизель + солнечные панели + накопители)); модернизация сетевой инфраструктуры (замена устаревших ЛЭП, развитие межсистемных связей для интеграции региональных энергорынков); экологизация энергетики (постепенный отказ от мазута

и угля в пользу газа и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (в рамках "Зеленой стратегии" РФ) [2].

Современные энергетические системы нуждаются в трансформации для удовлетворения требования устойчивого развития. Тригенерация, представляющая собой одновременное производство электрической энергии, тепла и холода, может стать эффективным решением для южных регионов России, богатых солнечными и ветровыми ресурсами. Это перспективное направление в энергетике, сочетающее высокую эффективность, экологичность и экономичность. С развитием возобновляемых источников энергии и интеллектуальных систем управления тригенерация становится ключевым элементом устойчивого энергоснабжения. Современные технологии тригенерации активно применяются в различных секторах: от промышленности и коммерческих зданий до жилых домов. Они обеспечивают высокую энергоэффективность, снижение затрат и экологичность.

Реализация тригенерационных систем в южных регионах России сталкивается с рядом проблем: низкая доступность и высокая стоимость технологии, недостаточное стимулирование со стороны государства, а также неразвитость инфраструктуры. Целью данного исследования является разработка конфигурации тригенерационной системы, использующей ВИЭ, которая сможет эффективно отвечать требованиям местного населения и промышленности [3].

Южные регионы России, включая Краснодарский край, Ростовскую область и Республику Северного Кавказа, характеризуются высоким уровнем солнечной инсоляции и хорошими условиями для создания ветровых электростанций. Например, согласно данным Росгидромета, среднее количество солнечных часов в Краснодаре составляет около 2700 в год, что открывает возможности для установки солнечных панелей.

Обзор литературы

Тригенерационные системы, которые одновременно производят тепло, электроэнергию и охлаждение, становятся все более популярными в современных энергетических решениях. Это особенно актуально для южных регионов России, где высокий уровень солнечной радиации и значительные температурные колебания создают оптимальные условия для их использования. Применение тригенерационных систем в южных регионах России может значительно снизить зависимость от ископаемых источников энергии, улучшить устойчивость энергетической инфраструктуры и снизить затраты на энергоснабжение для населения [4].

Перспективы развития тригенерационных систем широко обсуждаются в литературе в экономическом [5] и экологическом аспектах.

Обзор литературы по данной теме включает как исследования по принципам работы тригенерации, так и практические примеры применения в России. Например:

- Петров А.В. Текущие тенденции и проблемы интеграции ТГС в России // Экономика и управление. – 2023. – № 5. – С. 45-52 [6].
- Сидоров, И. Н. Анализ экономических и экологических преимуществ тригенерации // Вестник энергетики. — Москва: Энергия, 2023. — С. 45-50 [7].
- Панцырная Т. В., Парабин В. А., Дьяков А. В. «Тригенерация как способ повышения энергетической эффективности» — статья в журнале «Стратегические решения и риск-менеджмент», 2013, №6, с. 82–87 [8].
- Маларев В. И., Богданов И. А., Турышева А. В. «Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии» — статья в журнале «Промышленная энергетика», 2020, №3 [9].

- Ефремова С. А., Зацепина А. Н. «Внедрение тригенерационных установок как способ повышения эффективности энергосистем» — статья в журнале «Молодой учёный», 2021, №20 (362), с. 80–83 [10].

Материалы и методы

Моделирование тригенерационных систем представляет собой сложную многопараметрическую задачу, требующую комплексного подхода для анализа энергетических, экономических и экологических показателей.

Моделирование гелиосистем обогрева

Солнечные коллекторы преобразуют солнечное излучение в тепловую энергию, которая используется для нагрева воды или воздуха. Основные формулы, описывающие этот процесс, зависят от типа коллектора (плоские, вакуумные, воздушные и т. д.). Среди разнообразия солнечных коллекторов особого внимания заслуживают плоские селективные модели, получившие широкое распространение благодаря своей экономичности и простой конструкции (рис. 1). Их основные компоненты включают абсорбирующую панель со специальным селективным покрытием, прозрачное защитное покрытие, теплоизоляционный слой и прочный металлический каркас. Абсорбер, изготовленный из металла с высокой теплопроводностью, преобразует солнечное излучение в тепловую энергию, которая затем передается теплоносителю, обычно представляющему собой водно-гликолевую смесь. Защитное стекло выполняет двойную функцию - минимизирует тепловые потери и создает эффект парника, в то время как слой теплоизоляции предотвращает потери тепла с тыльной стороны устройства [11].

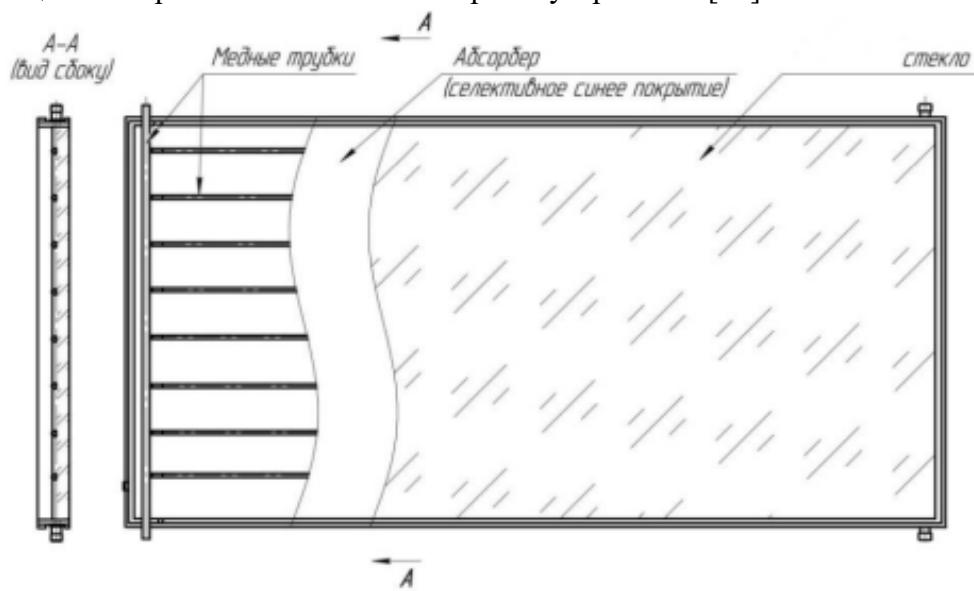


Рис. 1. Плоский солнечный коллектор

Более совершенными техническими характеристиками обладают вакуумные трубчатые системы, состоящие из стеклянных колб с двойными стенками, между которыми создано вакуумное пространство, обеспечивающее превосходную теплоизоляцию (рис. 2). Эти системы подразделяются на модели с косвенной теплопередачей, предназначенные для круглогодичной эксплуатации, и прямоточные варианты, оптимальные для сезонного использования [12].



Рис. 2. Вакуумный солнечный коллектор с тепловыми трубками

В замкнутой системе циркуляции происходит естественное перемещение теплоносителя: охлажденная жидкость из накопительной емкости поступает в теплообменный блок, где нагревается солнечной энергией и возвращается обратно в резервуар [13] (рис. 3). Благодаря такой непрерывной циркуляции в периоды интенсивной солнечной активности температура воды в накопителе может достигать 70°C [14].

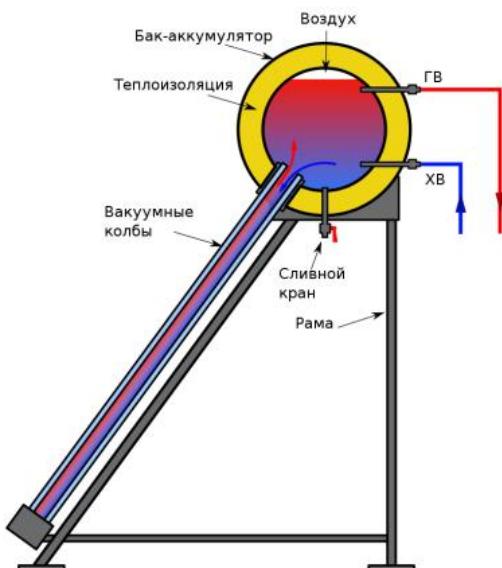


Рис. 3. Система с пассивной циркуляцией теплоносителя

Для моделирования солнечной радиации применимы следующие модели:

1. Детерминированная модель (Хоттеля-Вилльера)

Прямая солнечная радиация:

$$Gb = Gsc \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \cos(\theta z), \quad (1)$$

где: G_{sc} – солнечная постоянная ($\sim 1367 \text{ Вт/м}^2$);

n – день года (1–365);

θ_z – зенитный угол Солнца.

2. Стохастическая модель (для учета облачности)

Используется метод Монте-Карло:

$$G_{\text{ЭФФ}} = G_{\text{ЯСН}} \cdot (1 - k \cdot C), \quad (2)$$

где: C – облачность (0–1);

k – эмпирический коэффициент (~ 0.7).

Гидродинамическая модель

Для гидродинамической модели можно применить:

1. Уравнение движения теплоносителя

Упрощенное уравнение Навье-Стокса для ламинарного потока:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{-1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где: u – скорость теплоносителя, м/с;

ρ – плотность, кг/м³;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

2. Расчет потерь давления

Формула Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho u^2}{2}, \quad (4)$$

где: f – коэффициент трения;

L – длина трубы, м;

D – диаметр трубы, м.

Численные методы решения

К численному методу решения можно отнести:

1. Конечно-разностная схема

Дискретизация уравнения теплопроводности:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}, \quad (5)$$

где: α – температуропроводность, м²/с;

$\Delta t, \Delta x$ – шаги по времени и пространству.

2. Метод конечных элементов (FEM)

Слабая форма уравнения:

$$\int_{\Omega} (\nabla T \cdot \nabla w) d\Omega = \int_{\Gamma} q \cdot w d\Gamma, \quad (6)$$

где: w – весовая функция.

Оптимизация системы

1. Критерий эффективности КПД зависит от конструкции и температуры теплоносителя.

$$\eta = \frac{Qu}{G \cdot Ac}. \quad (7)$$

Градиентный метод оптимизации

Минимизация функции потерь:

$$\min_{UL, m \cdot f} (\eta_{\text{теор}} - \eta_{\text{эксп}})^2. \quad (8)$$

Моделирование систем охлаждения

Абсорбционные холодильные машины (АБХМ) функционируют благодаря уникальным свойствам раствора бромида лития, способного активно поглощать водяные пары при повышенных температурных режимах. В испарительной камере, где поддерживается вакуумное давление, происходит процесс испарения воды при температуре приблизительно $+3^{\circ}\text{C}$. Тепловая энергия для данного фазового перехода отбирается от охлаждаемой жидкости, температура которой понижается с 12°C до 5°C . Схема холодильной установки показана на рисунке 4 [15].

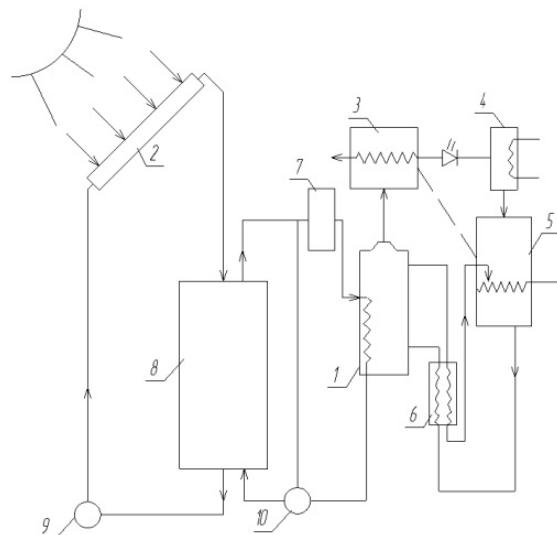


Рис. 4. Схема абсорбционной системы солнечного охлаждения с дополнительным источником тепла: 1 – парогенератор; 2 – плоский солнечный коллектор; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5 – абсорбер; 6 – регенеративный теплообменник; 7 – дополнительный нагреватель; 8 – бак-аккумулятор; 9 – насос; 10 – трехходовой вентиль

Согласно фундаментальному закону термодинамики о теплопередаче между телами с разной температурой, тепловая энергия естественным образом переходит от более нагретого объекта к менее нагретому, что приводит к постепенному выравниванию температур в системе (рис. 5).

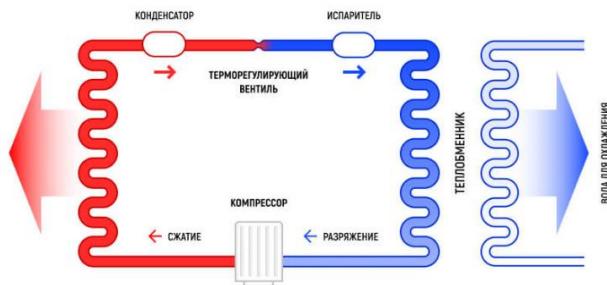


Рис. 5. Принцип работы чиллера

Система чиллер-фанкойл представляет собой альтернативу традиционным системам кондиционирования, где вместо циркуляции фреона между блоками используется вода или незамерзающая жидкость (рис 6).

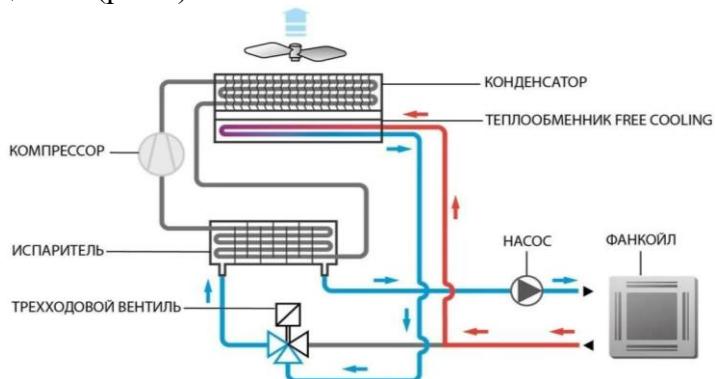


Рис. 6. Система чиллер-фанкойл

Современные вычислительные комплексы требуют эффективных систем охлаждения для поддержания стабильной работы оборудования [16].

Целью кондиционирования воздуха является поддержание таких параметров воздушной среды, при которых каждый человек, благодаря своей индивидуальной системе автоматического регулирования температуры тела, чувствовал бы себя комфортно.

Система работает по принципу замкнутого цикла (рис. 7). Воздух в помещении охлаждается, проходя через теплообменник внутреннего блока, в котором испаряется хладагент.

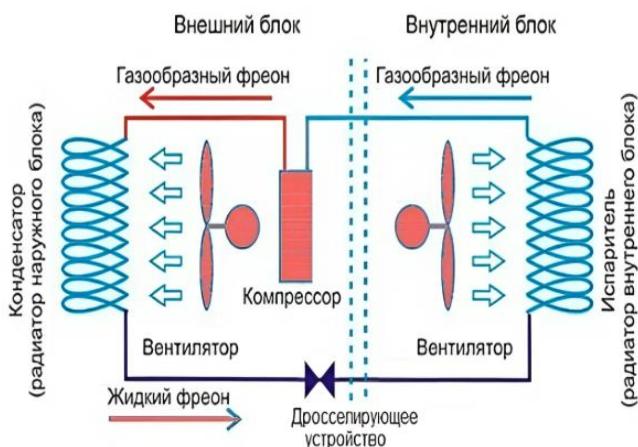


Рис. 7. Схема работы кондиционера

Сплит-система представляет собой кондиционер, состоящий из двух блоков – внешнего и внутреннего (рис. 8). Внутренний блок включает в себя систему управления – автоматики, фильтры для очистки воздуха, вентилятор для обдува теплообменника испарителя и сам испаритель. Внешний блок включает в себя компрессор, конденсатор, четырехходовой клапана, капиллярную трубку и систему автоматики [16].

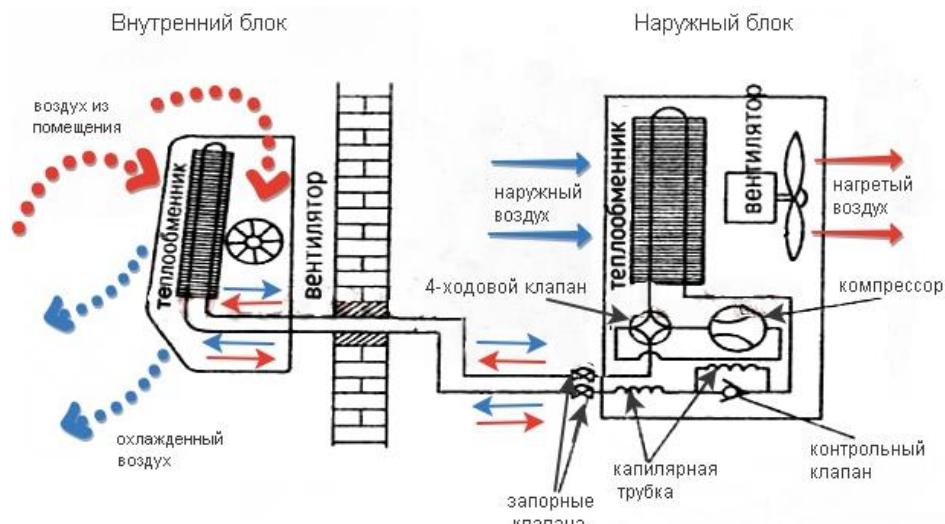


Рис. 8. Схема работы сплит-системы

Математическая модель системы охлаждения

1. Тепловой баланс вычислительного комплекса

Основное уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{обор}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{пот}}, \quad (9)$$

где: $Q_{\text{обор}}$ – тепловыделение оборудования (серверов), Вт; $Q_{\text{охл}}$ – тепловая мощность, отводимая системой охлаждения, Вт; $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери через корпус, Вт.

2. Модель жидкостного охлаждения

Теплообмен в жидкостном контуре:

$$Q_{\text{охл}} = m \cdot cp \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (10)$$

где:

m – массовый расход теплоносителя, кг/с; cp – удельная теплоемкость воды; $T_{\text{вх}}=20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вых}}=25^{\circ}\text{C}$ – температуры на входе и выходе.

3. Модель воздушного охлаждения

Теплоотвод через воздушный поток:

$$Q_{\text{охл}} = V \cdot \rho \cdot cp \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (11)$$

где: V – объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; $\rho=1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха; cp – удельная теплоемкость воздуха; $T_{\text{вх}}=20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вых}}=30^{\circ}\text{C}$.

Гидродинамические и аэродинамические расчеты

1. Потери давления в жидкостном контуре

Уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho u^2}{2}, \quad (12)$$

где: f – коэффициент трения; $L=50$ м – длина трубопровода; $D=0.025$ м – диаметр трубы; $u = \frac{m}{\rho \cdot A} \approx 0,92$ м/с – скорость потока.

2. Аэродинамическое сопротивление воздушного тракта

Потери давления в вентиляционной системе:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho u^2}{2}, \quad (13)$$

где: $\xi=2,5$ – коэффициент местных сопротивлений; $u = \frac{V}{A} = 1,58$ м/с – скорость воздуха (при площади сечения $A=0,5$ м²).

Оптимизация системы охлаждения

Критерии эффективности:

1. Коэффициент эффективности (COP):

$$COP = \frac{Q_{\text{охл}}}{W}, \quad (14)$$

где: W – затрачиваемая мощность на насосы/вентиляторы.

2. Энергетическая эффективность (PUE):

$$PUE = \frac{\text{Общая мощность ЦОД}}{\text{Мощность ИТ-оборудования}}. \quad (15)$$

Моделирование систем электроснабжения

Современные фотоэлектрические установки представляют собой эффективное решение для автономного энергоснабжения объектов. Принцип их работы основан на преобразовании солнечного излучения в электрическую энергию постоянного тока, которая затем трансформируется инвертором в переменный ток, пригодный для бытового использования. Фотоэлектрические панели содержат множество фотоэлектрических ячеек, обычно изготовленных из кремния (рис. 9) [17].

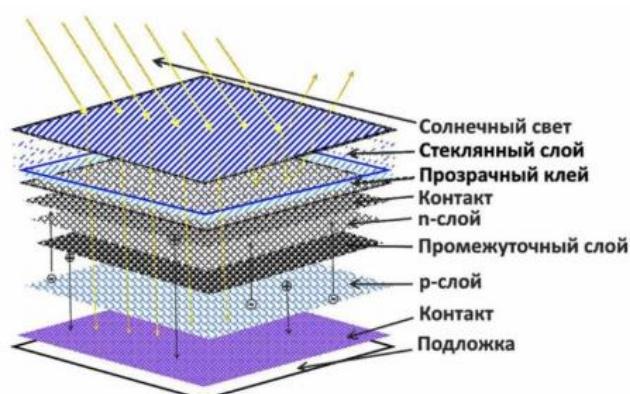


Рис. 9. Принцип работы солнечного фотоэлемента

Современные вычислительные комплексы потребляют от 100 кВт до 10 МВт электроэнергии, при этом требования к надежности электроснабжения достигают 99.9999% (уровень Tier IV).

Математические модели системы. Модель солнечной панели

Упрощенная модель мощности:

$$PPV(t) = \eta \cdot S \cdot G(t) \cdot (1 - 0,005 \cdot (Tcell(t) - 25)) \quad (16)$$

Мощность солнечного света, падающего на панель:

$$P_{\text{солн}} = G \cdot A \quad (17)$$

где: G – интенсивность солнечного излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$, $\sim 1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ при AM1.5);
 A – площадь панели (м^2).

Стандартная интенсивность солнечного излучения соответствует спектру AM1.5 и составляет $1000,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [18]. AM1.5 – это толщина 1,5 атмосферы, что соответствует зенитному углу солнца $48,2^\circ$. Такое значение используют для характеристики наземных солнечных элементов или модулей.

Электрическая мощность, вырабатываемая солнечной панелью:

$$P_{\text{эл}} = \eta \cdot P_{\text{солн}} = \eta \cdot G \cdot A \quad (18)$$

где: η – КПД солнечной панели (обычно 15–25% для кремниевых).

Электрическая энергия, выработанная за время t :

$$E = P_{\text{эл}} \cdot t = \eta \cdot G \cdot A \cdot t \quad (19)$$

Максимальная мощность в рабочей точке:

$$P_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} \quad (20)$$

где: U_{max} и I_{max} – напряжение и ток в точке максимальной мощности.

Температурная коррекция:

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{ст}} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_{\text{ст}})] \quad (21)$$

где: $P_{\text{ст}}$ – мощность панели в стандартных условиях; α – температурный коэффициент мощности ($-0,4\%/\text{ }^\circ\text{C}$ для кремниевых панелей); t – текущая температура панели ($\text{ }^\circ\text{C}$); $t_{\text{ст}}$ – стандартная температура испытаний.

Результаты исследования

В результате проведенных исследований была предложена система тригенерации, которая включает в себя гелиосистемы солнечные фотопанели и когенерационные установки. Предложенное решение обеспечивает баланс между генерацией и потреблением энергии, а также минимизирует потери. Оценка экономической эффективности показывает

значительное сокращение затрат на энергообеспечение при использовании предложенной системы (рис. 10).

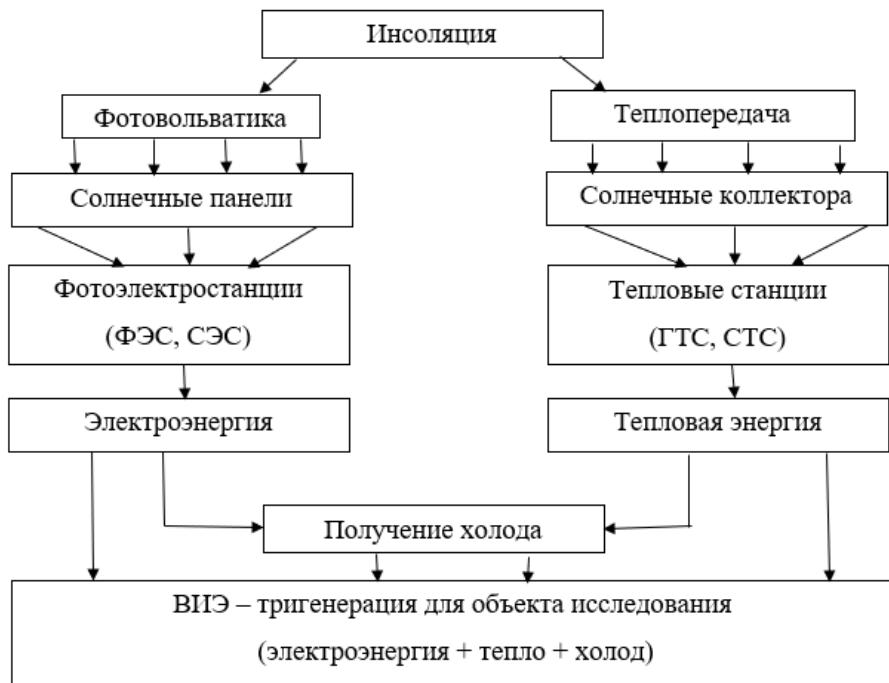


Рис. 10. Схема ВИЭ тригенерации объекта исследования

Разработка и внедрение комплексных математических моделей тригенерации с использованием гибридных гелиоустановок является новаторским подходом, который может усовершенствовать локальные энергосистемы (рис. 11). Эти модели могут учитывать различные параметры, такие как солнечное излучение, температуры, потребление энергии и другие факторы, влияющие на эффективность работы системы.

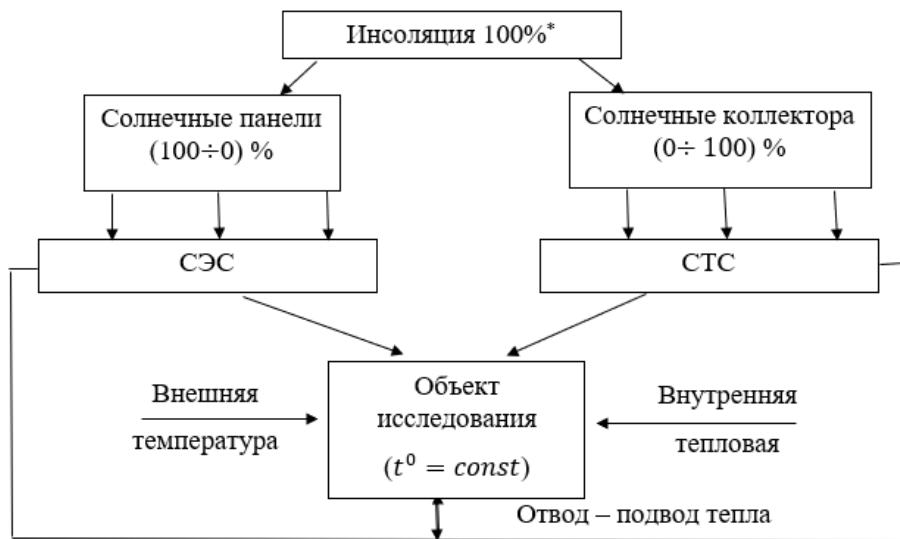


Рис.11. Схема тригенерации с применением возобновляемых источников энергии

Введение новых показателей для оценки эффективности систем тригенерации, основанных на теории принятия решений, представляет собой важный шаг в оценке и сравнении различных энергетических решений. Такие показатели могут помочь в более

детальном анализе, позволяя учитывать не только экономическую эффективность, но и экологические и социальные аспекты. Это, в свою очередь, улучшит принятие решений на уровне проектов и стратегий разработки локальных энергосистем.

Исследуя расход теплоносителя в зависимости от времени работы, были установлены этапы выхода гелиоколлектора на номинальный режим работы. С 10:25 до 10:40 происходит включение гелиоколлектора в работу (первичный нагрев теплоносителя). Далее с 10:40 до 12:10 происходит выход на номинальный режим работы. Под номинальным режимом подразумевается установление постоянного расхода теплоносителя через гелиоколлектор. За это время расход теплоносителя через гелиоколлектор изменился от 0,0 м³ /ч. с момента включения в работу, до 0,0258 м³ /ч. с момента выхода на номинальный режим. В номинальном режиме расход теплоносителя оставался постоянным и составлял, в среднем, 0,0260 м³ /ч., изменяясь на незначительную величину (0,0001 – 0,0003 м³ /ч.), вследствие кратковременного затенения облаками. За 4 часа работы гелиоколлектор прогрел 72,4 литра пресной воды. Выход на номинальный режим за 1 час 30 минут является достаточно хорошим показателем для стального абсорбера даже в апреле месяце [19]. На графике (рис.12) приведены зависимости температур на входе и выходе из гелиоколлектора от времени по показаниям термодатчиков.

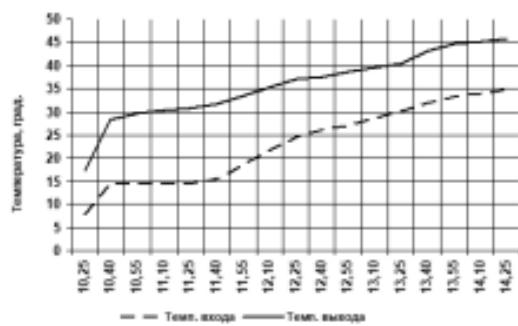


Рис. 12. Зависимость температур теплоносителя на входе и выходе из коллектора

На графике видно, что в период 10:25 – 10:40 происходит первичный нагрев теплоносителя (резкий подъем кривых). Далее температура возрастает более плавно, как до выхода на номинальный режим работы (граница в 12:10), так и в номинальном режиме [20]. На графике (рис.13) представлена зависимость выходной мощности гелиоколлектора от времени.



Рис. 13. Зависимость выходной мощности от времени.

Из графика видно, что выходная мощность гелиоколлектора (мощность солнечного излучения, переданная теплоносителю) резко повышается в первые 15 минут работы, а далее более плавно достигает своего максимума в 12:55, через 2 часа 35 минут работы. Так же видно, что после достижения максимума мощность начинает снижаться. Это связано с тем, что уменьшается разность температур теплоносителя на входе и выходе из коллектора (ΔT) [21]. На графике (рис.14) – зависимость коэффициента преобразования тепловой

энергии гелиоколлектора (η) от времени. Из графика видно, что кривая КПД аналогична кривой выходной мощности, то есть η максимальный в 12:55 и также снижается за счет уменьшения разности температур: ΔT [22]

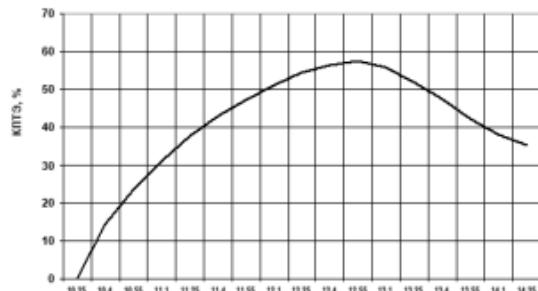


Рис. 14. Зависимость коэффициента преобразования от времени.

В зависимости от места расположения, времени года, нагрузки потребителей можно определяем тип и количество солнечных панелей, угол наклона [23] (рис. 15)

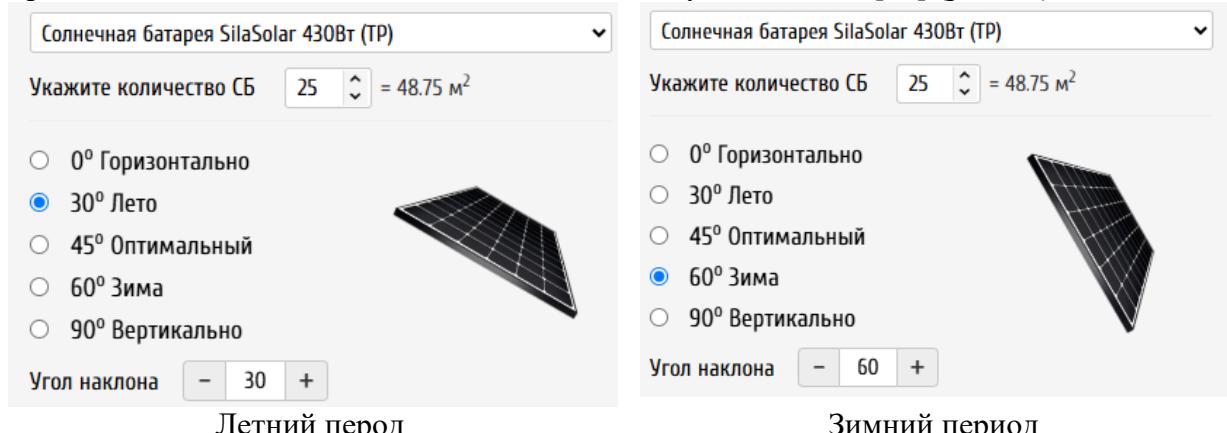
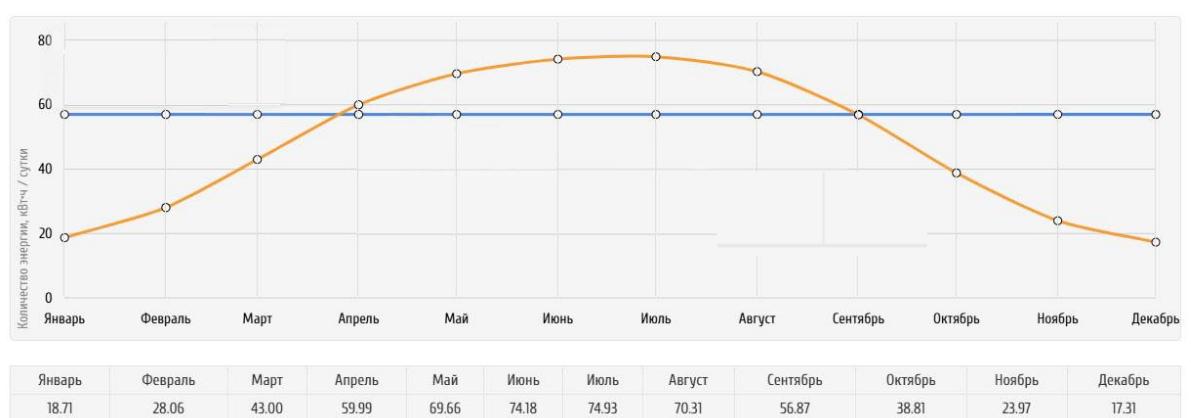


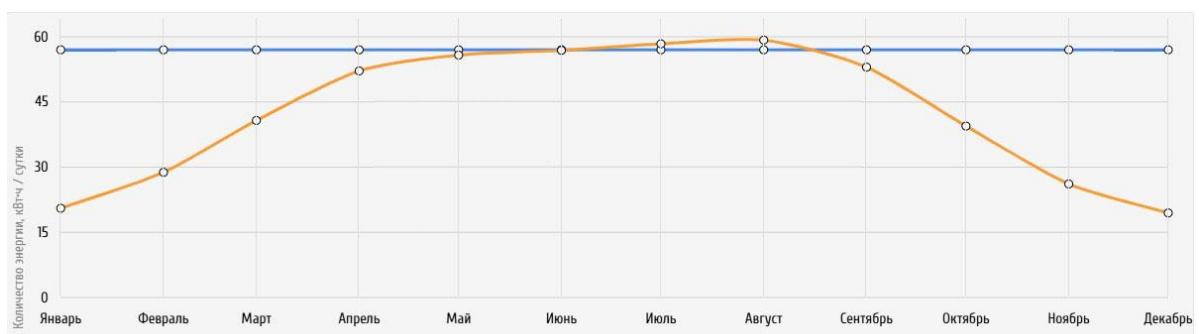
Рис. 15. Выбор типа солнечных панелей, их количества и угла наклона в летний и зимний периоды

Под графиком указывается среднегодовая выработка электроэнергии (кВт•ч/сутки) и суммарная выработка электроэнергии за год (кВт•ч).



Среднегодовая выработка электроэнергии: 47.98 кВт•ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 17503.41 кВт•ч.

а) летний период



Среднегодовая выработка электроэнергии: 42.54 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 15519.73 кВт·ч.

б) зимний период

Рис. 16 (а, б). График планируемой нагрузки и планируемой выработки электроэнергии в летний период

Ко всему прочему, ниже предоставляется диаграмма окупаемости солнечных батарей, при оптимальном варианте установки (45°) согласно тарифу на электроэнергию (рис. 17).

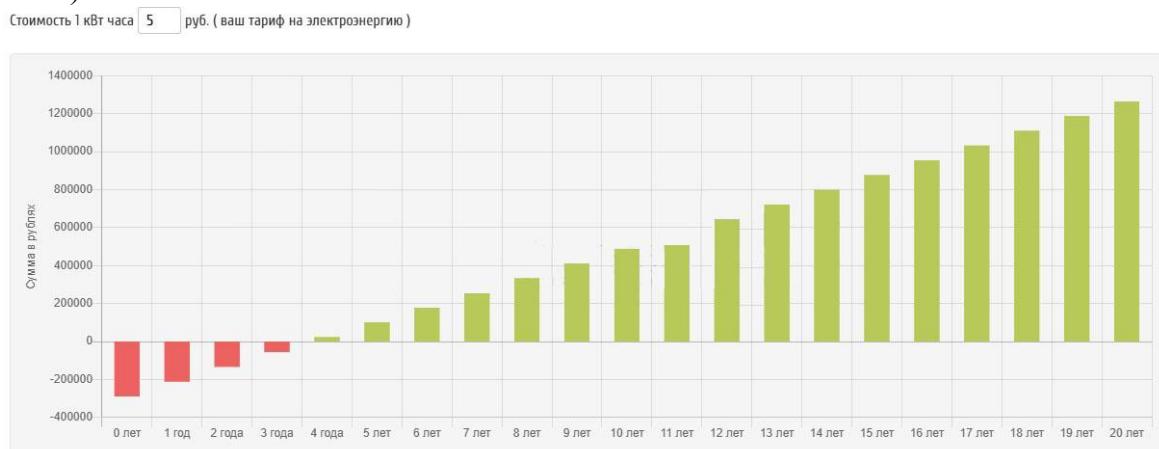


Рисунок 17. Диаграмма окупаемости солнечных батарей

Так же оказывается чистая прибыль и стоимость вложений на приобретение солнечных панелей (рис. 18).

Стоимость солнечных батарей	Срок окупаемости солнечных батарей	Чистая прибыль за 20 лет
288 000,00 руб.	4 года	1 407 765,00 руб.

Рис.18. Чистая прибыль от солнечных панелей и стоимость вложений

Так для панелей SilaSolar мощностью 430 Вт и общим количеством 25 единиц потребуется площадь в 48,75 м². При средней нагрузке 57 кВт·ч/сутки выработка электроэнергии от панелей покрывает, а в некоторые месяцы и превышает. Следовательно,

излишнюю электроэнергию можно отдавать в сеть и напротив, в необходимые месяцы можно получать недостаток из центральной сети.

Таким образом, данные результаты исследования могут способствовать более устойчивому и эффективному развитию энергетических решений, учитывающих современные вызовы и требования к экологической безопасности.

Заключение

В заключение можно отметить, что предложенные комплекс математических моделей тригенерации с применением гибридных гелиоустановок открывают новые горизонты для оптимизации локальных энергосистем. Уникальность данного подхода заключается в интеграции современных технологий с учетом специфики использования солнечной энергии, что может значительно повысить надежность и устойчивость энергетических решений. Введение новых показателей оценки эффективности систем тригенерации, основанных на теории принятия решений, позволяет более точно анализировать и оптимизировать параметры работы таких систем, что, в свою очередь, способствует более рациональному использованию ресурсов и снижению затрат.

Таким образом, проведенный анализ по применение данных систем не только расширяет научную базу в области тригенерации, но и предлагает практические инструменты для реализации устойчивых энергетических решений.

Развитие систем тригенерации на основе возобновляемых источников энергии в южных регионах России имеет большой потенциал для улучшения энергетической безопасности, снижения углеродных выбросов и повышения качества жизни населения. В дальнейшем необходимо учитывать результаты данного исследования при разработке государственной политики в области возобновляемой энергетики.

Проведенный анализ показал, что интеграция солнечных электростанций, гелиоколлекторов и абсорбционных холодильных машин позволяет создать энергоэффективную систему с высоким коэффициентом полезного действия, достигающим 80-90%.

Ключевым преимуществом предложенной системы является ее способность одновременно обеспечивать электроснабжение, отопление и кондиционирование помещений, что значительно повышает общую энергетическую эффективность жилого комплекса [24]. Особое значение имеет использование абсорбционных чиллеров, позволяющих преобразовывать тепловую энергию от гелиоколлекторов в холод для систем кондиционирования, что обеспечивает синергетический эффект всей системы [25].

Список литературы

1. Системный оператор ЕЭС. Перспективный баланс мощности ЕЭС России на 2024–2035 годы // 2023.
2. Правительство РФ. Программа развития электроэнергетики на 2021–2035 годы (Постановление № 1623) // 2021. URL:<https://base.garant.ru/70644238/>
3. Sharifishourabi, Moslem. A novel trigeneration energy system with two modes of operation for thermal energy storage and hydrogen production / Sharifishourabi, Moslem et al. // Energy. – 2024. - vol. 304. - P. 132121.
4. Schiffléchner, Christopher. (2023) «Geothermal trigeneration systems with Organic Rankine Cycles: Evaluation of different plant configurations considering part load behaviour» / Schiffléchner, Christopher et al. // Renewable Energy. – 2023. - vol. 207, issue C. - P. 218–233.

5. Бандара Р.Д.К.Х. A Review of Tri-Generation Systems and Their Economic and Environmental Performance / Р.Д.К.Х. Бандара и др.
6. Петров А.В. Текущие тенденции и проблемы интеграции ТГС в России / А.В. Петров // Экономика и управление. – 2023. – № 5. – С. 45-52.
7. Сидоров, И. Н. Анализ экономических и экологических преимуществ тригенерации // Вестник энергетики. — Москва: Энергия, 2023. — С. 45-50.
8. Панцырная Т. В. Тригенерация как способ повышения энергетической эффективности / Т. В. Панцырная, В.А. Парабин, А.В. Дьяков // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2013. - №6. -С. 82–87.
9. Маларев В. И. Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии / В.И. Маларев, И.А. Богданов, А.В. Турышева // Промышленная энергетика. – 2020. – №3.
10. Ефремова С. А. Внедрение тригенерационных установок как способ повышения эффективности энергосистем / С.А. Ефремова, А.Н. Зацепина // Молодой учёный. – 2021. - №20 (362). - С. 80–83.
11. Kuvshinov V.V. Storage system for solar plants / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina, L.M. Abd Ali et al. // Applied Solar Energy. - 2019. - Т. 55. - № 3. - С.153-158.
12. Лосева И.Г. Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (сэс, вэс, далее - виэ). Использование величины снижения мощности виэ в качестве нормативного возмущения / И.Г. Лосева, М.Д. Перышкин, Е.Г. Какушина и др. // Энергетические установки и технологии. - 2020. - Т. 6. - № 4. - С. 51-56.
13. Кочетов И.А. Применение фотоэлектрических панелей нового поколения для увеличения эффективности работы солнечных установок / И.А. Кочетов, М.А. Старченко, В.В. Кувшинов et al. // Энергетические установки и технологии. - 2020. - Т. 6. - № 3. - С. 35-39.
14. Гурьев В.В. Оценка потенциала развития возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя / В.В. Гурьев, Е.Г. Какушина, В.В. Небесный et al. / Энергетические установки и технологии. - 2020. - Т. 6. - № 3. - С. 23-29.
15. Хорева В.А. Эксергетическая эффективность технологий тригенерации на базе инсоляции юга Сибири. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск – 2024.
16. Принцип работы кондиционера [Электронный ресурс] // Dantex. – URL: Dantex.ru Дата обращения 15 августа 2025г.
17. Ефремова, С. А. Внедрение тригенерационных установок как способ повышения эффективности энергосистем / С. А. Ефремова, А. Н. Зацепина // Молодой учёный. — 2021. — № 20 (362). — С. 80–83.
18. Харченко В. В. Оценка параметров нанометрических полос видимой части солнечного спектра / Харченко В. В., Никитин Б. А., Панченко В. А., Тихонов П. В. // E-Scio. - 2020. - №6 (45).
19. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства / Д.Ф. Бордан, В.В. Кувшинов, Е.Г. Какушина и др.// Энергетические установки и технологии. - 2021. - Т. 7. - № 1. - С. 46-52.
20. Гурьев В.В. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы / В.В. Гурьев, В.В. Кувшинов, Б.А. Якимович, А.Г. Аль Байрами, Е.Г. Какушина // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. - 2022. - Т. 25. - № 1. - С. 108-117.

21. Vologdin S.V. Analysis of various energy supply scenarios of crimea with allowance for operating modes of solar power planta / S.V. Vologdin, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov et al. // Applied Solar Energy. - 2019. - Т. 55. - № 4. -C. 229-234.
22. Kuvshinov V.V. Studies of the PV array characteristics with changing array surface irradiance / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina, V.V. Kuvshinova et al. // Applied Solar Energy. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С.223 - 228.
23. Кувшинов В.В. Возможности уменьшения мощностных потерь фотоэлектрических панелей в условиях Крымского региона / В.В. Кувшинов, Е.Г. Какушина, В.П. Коломийченко и др. // Энергетические установки и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 40-44.
24. Овсянник А.В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А.В. Овсянник, В.П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 263–275.
25. Куличихин В. В. Бесперспективность применения тригенерационных установок на российских объектах распределённой и малой энергетики // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – № 4. – С. 165–173.

TRIGENERATION SYSTEMS FOR THE SOUTHERN REGIONS OF RUSSIA USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

E. G. Kakushina, N. M. Shaitor, B. A. Yakimovich

FSAEI of HE Sevastopol State University
33, Universitetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation

Abstract. In the context of global climate change and the depletion of traditional energy resources, the use of renewable energy sources (RES) is becoming increasingly important. This article explores the development of a tri-generation system focused on the southern regions of Russia, with the aim of improving energy efficiency and reducing environmental impact. Modern modeling methods based on an integrated approach and the potential for using trigeneration systems in the southern regions of Russia with a focus on renewable energy sources (RES) are used as methods and tools for solving this problem. A theoretical justification has been conducted. Integration models have been evaluated, the advantages and challenges of implementing tri-generation systems have been analyzed, and their impact on the sustainable development of regions has been examined. Trigeneration systems can be implemented in various ways, including direct generation of heat and electricity, as well as the use of absorption refrigeration machines to produce cold. This article discusses the most relevant technological solutions.

Keywords: trigeneration systems, renewable energy sources, direct generation of heat and electricity, and absorption refrigeration machines.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.