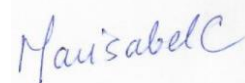


На правах рукописи



Контрерас Виельма Марисабель

**ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ВИЭ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ВЕНЕСУЭЛЫ**

05.14.08 – «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2018

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

Научный руководитель:

Елистратов Виктор Василевич,
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Водохозяйственное и
гидротехническое строительство» ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Бобыль Александр Васильевич
Доктор физ.-мат. н., профессор, ведущий
научный сотрудник Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе РАН

Велькин Владимир Иванович
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Атомные станции и возобновляемые
источники энергии» Уральского федерального
университета им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кубанский
государственный аграрный университет имени
И.Т. Трубилина»

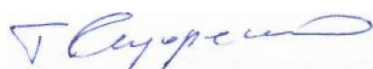
Защита диссертации состоится «24» апреля 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.17 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29., Гидрокорпус-2, ауд 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета

<http://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г

Ученый секретарь диссертационного
совета Д212.229.17, доктор технических
наук, доцент



Сидоренко Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с непрерывным ростом энергозатрат, повышением стоимости и дефицитом органического топлива, отрицательным влиянием на окружающую среду и здоровье человека электростанций на органическом топливе в последние годы значительно возрос интерес к возобновляемым источникам энергии для производства электрической энергии в мире, и особенно в развитых и развивающихся странах. Это связано с экологичностью и отсутствием затрат на добычу первичных энергоресурсов. В Боливарианской Республике Венесуэла развитие электроэнергетики на основе возобновляемых источников энергии происходит более медленными темпами, за исключением крупной гидроэнергетики, которая обеспечивает около 70% производства всей электроэнергии в стране. Одним из крупнейших в мире гидроэнергетических комплексов является ГЭС Гури, состоящий из трех гидроэлектростанций, расположенных на реке Карони в штате Боливар на юго-востоке страны. Комплекс ГЭС Гури включает гидроэлектростанцию Симон Боливар (установленная мощность 10000 МВт, производство электрической энергии около 57.000 ГВт·ч/год). Эта гидроэлектростанция занимает третье место среди электростанций, построенных в мире. В последнее десятилетие боливарианское правительство посредством Национальной Электрической Корпорации (CORPOELEC) и Фонда Электрического Развития (FUNDELEC) проводит энергетическую политику развития возобновляемых ресурсов страны в рамках проекта «Симон Боливар», первого социалистического плана развития Венесуэлы как независимой энергетической державы. В последние годы были установлены 3163 автономных комплекса следующих типов: фотоэлектрические системы для систем очистки воды, системы опреснения и орошения, энергокомплексы на основе ВИЭ для электроснабжения рекреационных зон, общин, школ, больниц, домов, военных постов, общественных мест и т.д. До 2019 года планируется ввод 108 МВт сетевых ВЭС и автономных ветро-солнечных установок общей мощностью 34051 кВт.

До настоящего времени в стране отсутствуют систематические исследования по оценке потенциала ВИЭ Венесуэлы и, прежде всего, солнечной и ветровой энергии. Поэтому одной из актуальных задач является оценка валового и технического потенциала ветровой и солнечной энергии для всей территории страны с определением регионов, наиболее благоприятных для использования ресурсов ВИЭ. Также весьма актуальной является задача разработки методик для строительства энергокомплексов на ВИЭ на перспективных площадках, удовлетворяющих потребностям в электроснабжении автономных общин.

Цель диссертационной работы

Целью работы является оценка валового и технического потенциала ресурсов ВИЭ на территории Венесуэлы и обоснование параметров автономной системы электроснабжения на их основе.

Основные задачи

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие основные задачи:

- Выполнена оценка современного состояния энергетики Венесуэлы и определены масштабы внедрения объектов на основе ВИЭ.
- Разработана методика оценки ресурсов ветровой и солнечной энергии в Венесуэле для районирования территории по уровню ресурсного обеспечения.
- Определены валовый и технический потенциалы ветровой и солнечной энергии в Венесуэле.
- Созданы атласы солнечных и ветровых ресурсов Венесуэлы и выявлены территории, перспективные для использования ВИЭ.
- Выполнены анализ и классификация автономных систем электроснабжения и оборудования на основе солнечной и ветровой энергии для различных видов потребителей в Венесуэле.
- Разработаны модели элементов энергокомплекса в среде MATLAB.
- Разработана методика оптимизации параметров системы электроснабжения на основе ВИЭ для условий Венесуэлы на основе минимизации удельных дисконтированных затрат на производство электроэнергии (LCOE – Levelized Cost of Energy).

- Проведена апробация методики на примере создания типовой системы индивидуального электроснабжения на основе ВИЭ для общины Керепаре, которая находится на северо-востоке Венесуэлы.

Научная новизна

1. На основе анализа климато-географических условий Венесуэлы и созданной методики впервые оценены валовые и технические ресурсы ветровой и солнечной энергии для всей территории страны.
2. Впервые созданы атласы солнечных и ветровых ресурсов для территории Венесуэлы.
3. Разработана методика и математические модели оборудования в среде MATLAB для расчета параметров и режимов работы систем автономного энергоснабжения на основе ВИЭ.
4. Выполнена оценка эффективности типового энергокомплекса на базе солнечных фотоэлектрических и ветроэнергетических установок по критерию минимизации LCOE.

Методика исследований

Решение поставленных в работе задач осуществлялось на основе использования апробированных методов математического моделирования и системного анализа многомерных нелинейных задач.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценка природно-климатических характеристик для расчёта энергетического потенциала солнечных и ветровых ресурсов на территории Венесуэлы.
2. Атлас солнечных и ветровых ресурсов для территории Венесуэлы.
3. Методика и математические модели обоснования параметров и режимов работы энергокомплекса на основе ВИЭ для автономного потребителя в условиях Венесуэлы.
4. Результаты исследования эффективности использования энергокомплекса на базе СФЭУ для обеспечения электроэнергией типового автономного сельского потребителя Венесуэлы на примере общины (Керепаре).

Достоверность результатов исследований, теоретических и методических обоснований, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в разработках научно-обоснованных и проверенных методов различных научных дисциплин, корректным применением адекватного математического аппарата.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования позволяет получать информацию по ветроэнергетическим и солнечным ресурсам в интересующей точке территории Венесуэлы с использованием созданного атласа ресурсов ВИЭ. Разработанная методика проектирования автономных систем электроснабжения для типовой системы индивидуального энергоснабжения использована компанией CORPOELEC при разработке планов развития электроэнергетики на основе ВИЭ.

Личный вклад автора

Диссертация является результатом самостоятельных исследований автора. Все научные положения и результаты, определяющие научную новизну и практическую ценность работы, получены соискателем лично. Личное участие автора подтверждено публикациями и выступлениями на научно-технических конференциях.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены на конференциях и семинарах, в том числе международных: XLI, XLII, XLIII и XLIV международных конференциях «Неделя науки СПбГПУ» в 2012-2015 гг., международных конференциях «WWEC» в 2013 г., международных форумах «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности» (REENFOR) в 2014 г. Государственный контракт «Разработка методов и интеллектуальных технологий автономного энергоснабжения на основе традиционных и возобновляемых источников энергии» по ФЦП «Исследования и разработки...».

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 128 страниц основного текста, 58 рисунков, 26 таблиц и список использованной литературы из 156 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, приведены сведения и оценка научной новизны практической ценности полученных результатов, краткое изложение содержания работы.

В первой главе анализируется современное состояние электроэнергетического комплекса Венесуэлы и основных проблем развития энергетики, в том числе возобновляемой. Рассматриваются возможные пути решения этих проблем. В настоящее время в Венесуэле электроэнергия вырабатывается, в основном, на крупных гидроэлектростанциях (ГЭС), на тепловых электростанциях (ТЭС) и на дизель-генераторных установках (ДГУ). Общая установленная мощность всех электрических станций в Венесуэле составляет 25 456,56 МВт и распределяется следующим образом: 15526,66 МВт - на ГЭС, и 9929,9 МВт - на тепловых электростанциях. Программа развития электроэнергетики страны предусматривает увеличение производства электроэнергии, расширение системы передачи и распределения электроэнергии, а также увеличение использования возобновляемых источников энергии. Основной задачей энергетической политики Венесуэлы до 2019 года является генерация более 600 МВт электроэнергии, 500 МВт из которой составит ветровая электроэнергия. Концепция развития систем энергоснабжения на основе ВИЭ в данных регионах регламентируется законодательством и различными национальными проектами. Однако электроэнергетическая сеть Венесуэлы имеет структуру, при которой значительная часть страны, особенно ее южная часть, остается неохваченной распределительными сетями, поэтому там наблюдается дефицит электроэнергии. На 2014 год почти 13000 общин не имеют электроснабжения.

Решение проблем покрытия наблюдающегося дефицита электроэнергии в децентрализованных населенных пунктах в настоящее время является приоритетной задачей для улучшения социально-экономического развития регионов. Использование энергии только одного вида возобновляемого источника не позволяет обеспечить оптимальное покрытие графика нагрузки локального потребителя из-за непостоянства прихода первичного ресурса ВИЭ, что обуславливает необходимость комбинированного использования энергоустановок на основе ВИЭ. Такой подход увеличит эффективность электроснабжения изолированных потребителей; позволит снизить стоимость аккумулирующих устройств; повысит надежность электроснабжения потребителя и сократит капитальные вложения всей системы в целом. В диссертации проанализированы различные технологии использования солнечных и ветровых ресурсов, параметры установок, приемлемых для условий Венесуэлы и сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе проведен анализ оценки энергетических ресурсов возобновляемых источников по всей территории Венесуэлы. В целом проблемами оценки ресурсов ВИЭ занимались Безруких П.П., Бобыль А.В., Борисенко М.М., Елистратов В.В., Масликов В.И., Николаев В.Г., Сидоренко Г.И., Стадник В.В., Федоров М.П., Ineichen P., Klucher T. M. и др. Информация о поступлении ресурсов ВИЭ фиксируется, как правило, метеостанциями. Существует проблема получения достоверной информации о ресурсах ВИЭ в Венесуэле. Поскольку наземные метеостанции Венесуэлы находятся, в основном, рядом с аэропортами в крупных городах страны и их немного, то существуют целые регионы в стране, где полностью отсутствуют данные метеонаблюдений. Существующие способы исследования прихода ресурсов солнечной и ветровой энергии как правило, формируются из совокупности почасовых годовых рядов наблюдений за скоростью и направлением ветра и почасовых годовых рядов наблюдений за поступлением солнечного излучения. Дополнительно к данным наблюдений за скоростью, направлением ветра и солнечным излучением формируемых на основе метеорологических станций Венесуэлы, полученных из Министерства народной власти по вопросам безопасности и обороны, в работе проанализированы данные из реанализа NCAR/NCEP, NARR, MERRA и ECMWF, для выявления наиболее репрезентативны. Для сравнения выбирались несколько точек с наиболее близкими данными, полученными из каждого источника. Для оценки потенциала ветрового ресурса всей территории Венесуэлы были проанализированы данные, полученные с 35 наземных метеорологических станций, находящихся в сельских, городских районах, аэропортах и других объектах. В дополнение к этому, были привлечены данные из трех источников: Современный ретроспективный анализ (MERRA), Североамериканский региональный повторный анализ (NARR), Национальный центр атмосферных исследований (NCAR). Сравнительный анализ данных полученных из этих источников для надежной оценки ветрового режима, позволил выбрать

источник, наиболее подходящий для топографических и климатических условий Венесуэлы. Наиболее достоверные данные получены из источника NARR, так как значения шероховатости, скорости ветра, температуры, влажности и солнечной радиации совпадают с реальными значениями, полученными в результате натурных наблюдений.

Для повышения достоверности оценок в работе использована трехуровневая методика оценки ветроэнергетических ресурсов, разработанная в НОЦ ВИЭ СПбПУ и адаптированная к условиям Венесуэлы. На первом уровне на основании справочных данных, представленных среднесезонными значениями скорости и направления ветра, а также удельной мощностью ветрового потока, для конкретной точки производится предварительная оценка ветроэнергетических ресурсов.

На втором уровне региональной оценки ВЭР, после выбора перспективного района, производится мезомасштабное численное моделирование ветрового потока на произвольной высоте над уровнем земли.

В результате моделирования для заданных высоты и шага сетки формируются многолетние почасовые ряды скорости и направления ветра, на основании которых производится построение уточненной карты ВЭР. Ближайший к месту расположения энергокомплекса ряд многолетних данных о скорости и направлении ветра будет использован в качестве исходных данных на третьем уровне, на котором проводится микромасштабное моделирование ветрового потока.

В работе использованы исходные данные NARR, доступные для скачивания с официального сайта с шагом осреднения 3 часа. Кроме горизонтальной составляющей скорости ветра (V) данные NARR содержат еще 310 метеорологических параметров, в том числе:

- температура воздуха (Air Temperature, K);
- вертикальный сдвиг скорости (Vertical Speed Shear, 1/s);
- растительный слой (vegetation, %);
- альbedo поверхности (Albedo, %);
- плотность коротковолнового излучения (Downward shortwave radiation flux, W/m^2);
- суммарная облачность (Total cloud cover, %);
- суммарные осадки (Total precipitation, kg/m^2).

На рисунке 1 показана блок-схема, оценки ветрового потенциала для зон со сложной поверхностью, а также в лесах, занимающих значительную территорию Венесуэлы.

В блоке формирования исходных данных сформированы база параметров ветрового потока в угловых точках на основе данных 35 наземных метеостанций и базы реанализа спутниковых наблюдений NARR, а также сформированы цифровые модели рельефа и орографии.

После формирования исходных данных проводится анализ возможного для использования оборудования ВЭУ для выбора высоты расчёта технического ветроэнергетического потенциала. Предложено рассматривать высоты 30,55, 100 м.

На следующем шаге проанализировано и выбрано программное обеспечение: из рассмотренных ПО WindPRO, METEODYN и WAsP для проведения мезомасштабного и микромасштабного моделирования. В работе было использовано ПО WindPRO.

По результатам моделирования формируется таблица технического потенциала в узловых точках для выбранных на предыдущем этапе оборудования и высоты.

На последнем этапе проводится построение ветроэнергетического атласа с использованием любого ПО, отображающего данные на карту местности. В работе на этом этапе было использовано ПО AutoCAD.

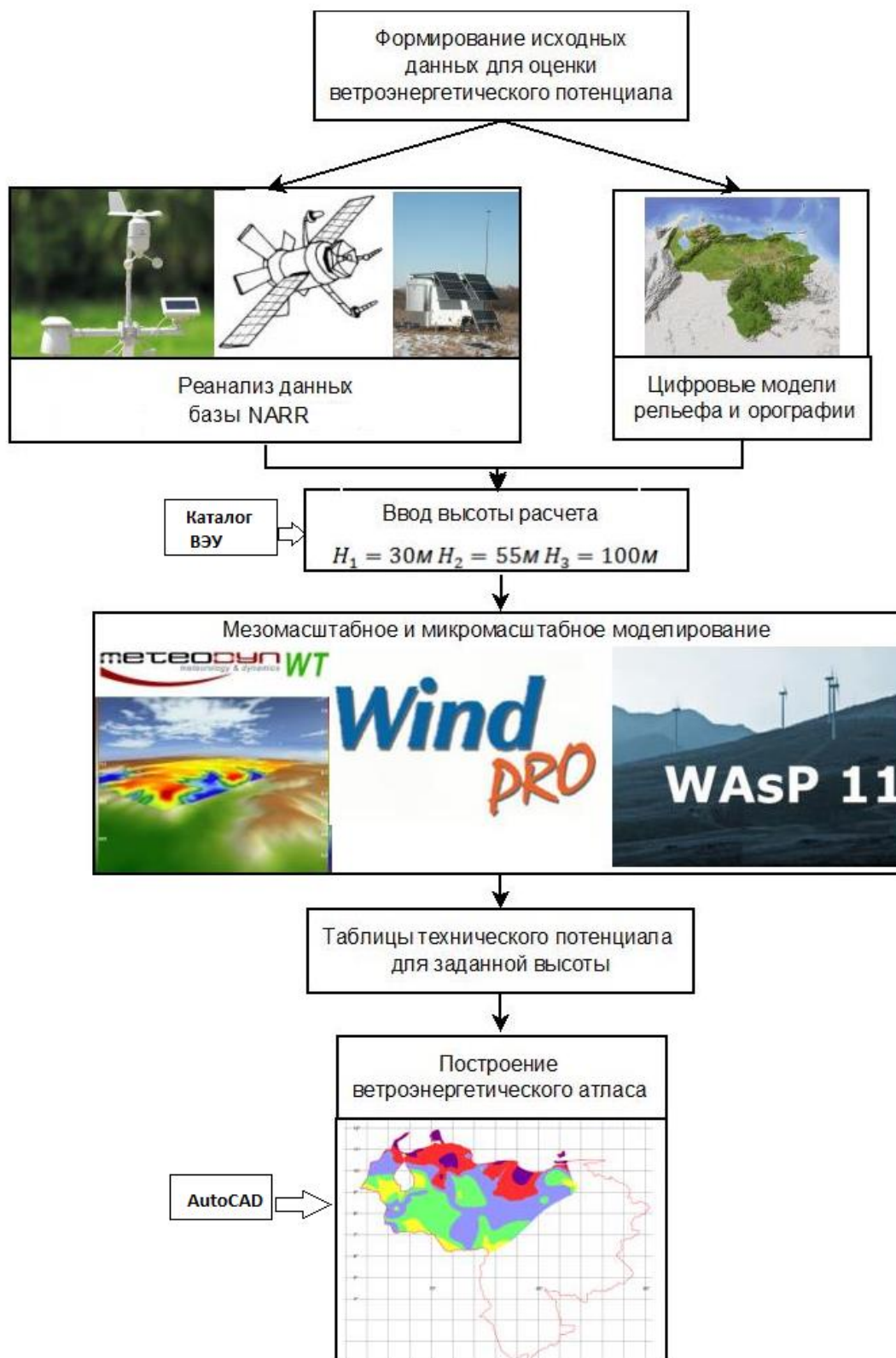


Рис 1. Блок-схема оценки ветрового потенциала Венесуэлы

Технический потенциал ветровой энергии рассчитывается с использованием ветрового генератора марки GAMESA модели АЕ61 с номинальной мощностью 1320 кВт, класс I – А. Такой же используется в Венесуэле в одном из ветровых парков, который в настоящее время находится на стадии строительства.

Территория страны разбивается на квадраты с шагом 1 км, в узлах которых определяется значение удельного потенциала. Всего на территории Венесуэлы рассматривалось 240 точек.

Расчет мощности ВЭУ в каждой точке проводился по формуле:

$$N_{ВЭУ} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot C_p \cdot V^3,$$

где A – площадь ветроколеса ВЭУ, m^2 ; C_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность ветра, kg/m^3 ; V – скорость ветра на оси ветроколеса, m/s .

Годовая выработка ВЭУ в точке описывается выражением:

$$\mathcal{E}_{ВЭУ} = N_{ВЭУ} \cdot T_{исп},$$

где $T_{исп}$ – годовое число часов использования установленной мощности ВЭУ.

После этого все данные сводятся в таблицу, по координатам наносятся на карту и с помощью интерполяции формируются зоны распределения удельного потенциала (рис. 2). Удельный ветровой потенциал, которым обладает Венесуэла на высоте в 55 м, варьируется от 1000 до 5500 кВт·ч/км².

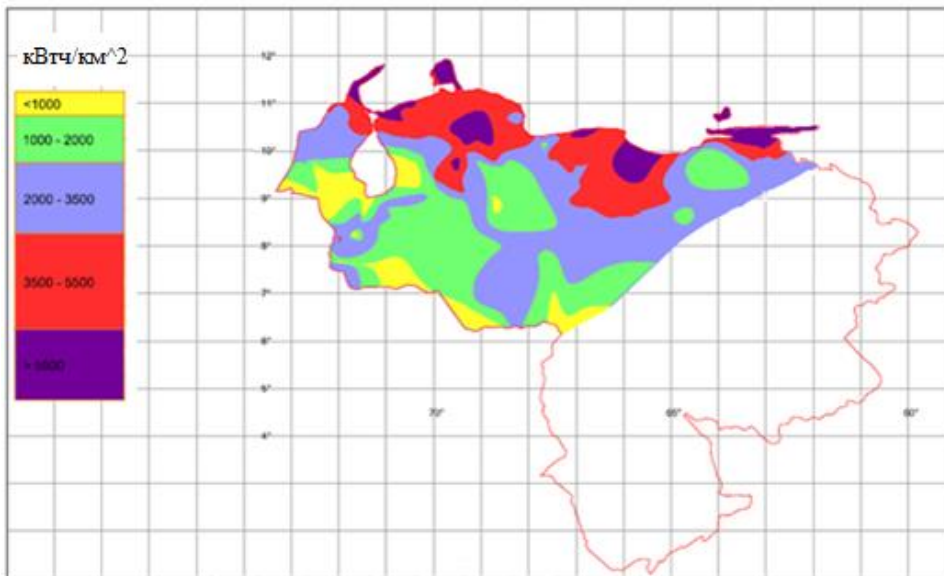


Рис 2. Удельный ветроэнергетический потенциал территории Венесуэлы на высоте 55 м

Разработана методика определения технического потенциала солнечной энергии Венесуэлы. На основе базы данных NASA территория Венесуэлы была разбита на 340 точек на расстоянии 0,5 градуса широты и 0,5 градуса долготы друг от друга. Для каждого узла были рассчитаны значения среднесуточных удельных приходов солнечной радиации, кВт·ч/м². Значения суточной выработки СФЭУ в узлах сетки описывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{сут}^{СФЭУ} = \int_{t_{восх}}^{t_{зах}} N_{СФЭУ}(t) \cdot dt$$

где $N_{СФЭУ}(t)$ - мощность СФЭУ определяется по формуле:

$$N_{СФЭУ}(t) = E_{СФЭУ}^{СИ}(t) \cdot S_{СФЭУ} \cdot \eta_{СФЭУ}$$

где $E_{СФЭУ}^{СИ}(t)$ - плотность потока солнечного излучения, падающая на ориентированную поверхность установки; $S_{СФЭУ}$ - значение площади солнечной фотоэлектрической установки; $\eta_{СФЭУ}$ - КПД СФЭУ.

Время t определяется от моментов восхода и захода солнца с использованием данных о широте места φ_M , коэффициента преобразования угла в градусы $k_{wc} = \frac{15^\circ}{\text{час}}$ и угла наклона солнца δ_n в определенный день года.

Тогда годовая выработка СФЭУ для узловой точки j описывается выражением:

$$\mathcal{E}_{ГОД}^{СФЭУ} = \sum_1^{365} \mathcal{E}_{СУТi}^{СФЭУ},$$

На рисунке 3 приведена блок-схема определения валового удельного потенциала солнечного излучения. Для расчетов использована метеорологическая база данных NASA часовых, дневных и месячных сумм прямой и рассеянной радиации на горизонтальную поверхность, а также данных по числу часов солнечного сияния и альбедо земной поверхности.

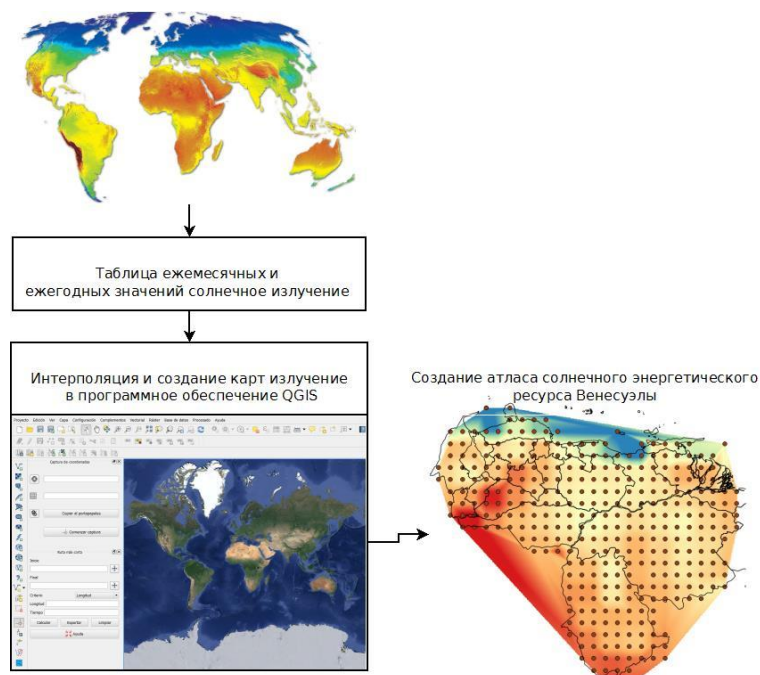


Рис 3. Алгоритм методологии создания атласа валового потенциала солнечной энергии Венесуэлы

Для практического расчета солнечного технического потенциала использованы фотоэлектрические модули типа А-160 АТЕРСА. Для оценки технического потенциала солнечных фотоэлектрических установок выполнен пересчет значений валового потенциала с использованием модулей А-160 с КПД=15% и в предположении, что модули располагаются под углом 0° , так как территория Венесуэлы расположена на широте от 0° до 9° .

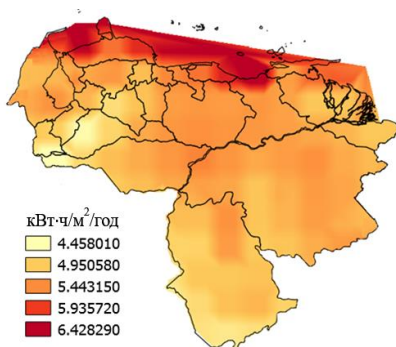


Рисунок 4. Атлас удельного технического солнечного потенциала (на базе СФЭУ с модулями А-160) Максимальные значения выработки наблюдаются на севере страны, который характеризуется сухим климатом, со значениями солнечного излучения 6,0 и 6,5 кВт·ч/м² в день. Этому способствует высокий приход суммарной радиации не только в летний, но и в дождливые периоды, особенно в декабре-марте, когда имеет место сочетание большого прихода радиации и низкой температуры воздуха, способствующие увеличению КПД преобразования солнечной энергии в электрическую. Территория Венесуэлы состоит из 9 регионов: Андский, Столичный, Центральный, Центральнo-западный, Гайанский, Островной, Льяносский, Северо-восточный, Сулианский. С использованием значений удельного потенциала и площадей регионов были определены общие ресурсы ВИЭ с допущением, что вся площадь региона участвует в оценке.

Валовый потенциал солнечной и ветровой энергии в Венесуэле оцениваются в 3-5 кВт·ч/м² в сутки и 4000 МВт, соответственно, можно считать, что страна имеет высокий солнечный и ветровой потенциал вследствие близости к экватору.

Общий технический потенциал солнечной и ветровой энергии, а также площадь каждого региона Венесуэлы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Общий технический потенциал солнечной и ветровой энергии по регионам Венесуэлы

Регион	Площадь, км ²	Технический солнечный потенциал, ТВт·ч/год	Технический ветровой потенциал, ТВт·ч/год
(1) Андский	90 550	426	190
(2) Столичный	9 880	62	39
(3) Центральный	23 464	127	72
(4) Центрально-западный	66 900	401	362
(5) Гайанский	458 344	2338	Нет данных
(6) Островной	1 411	9	8,4
(7) Льяносский	142 900	772	300
(8) Северо-восточный	84 030	479	403
(9) Сулианский	63 100	366	265
Суммарно	940 579	4 980	1 639 (без Гайанского региона)

В этой таблице технический ветровой потенциал указан для высоты 55 м. Суммарный технический солнечный потенциал Венесуэлы составляет 4980 ТВтч/год, а суммарных технический ветровой потенциал – 1639 (без учёта Гайанского региона из-за отсутствия метеостанций). Община Корепаре, на основе которой будут рассматриваться схемы энергокомплексов на базе ВИЭ, находится в Северо-Восточном регионе. Из таблицы можно сделать вывод, что в этом регионе технический солнечный потенциал преобладает над техническим ветровым потенциалом на 76 ТВтч/год.

В третьей главе обобщены работы по теме обоснования параметров систем энергоснабжения на основе ВИЭ в зонах централизованного и децентрализованного, изложенные в трудах Амерханова Р.А., Безруких П.П., Бляшко Я.И., Велькина В.И., Грибкова С.В., Елистратова В.В., Конищева М.А., Сидоренко Г.И., Толмачева В.Н., Тягунова М.Г., Christofferson R. D., Manwell J.F. и др. Глава состоит из двух частей. В первой части приведена методика обоснования параметров и режимов работы систем на основе ВИЭ для автономного потребителя на основе классификации типовых автономных систем электроснабжения, используемых в Венесуэле. В настоящее время государство Венесуэла находится в поисках способа рационализации процесса принятия решений об эффективности долгосрочной электрификации удаленных областей страны. Растущий спрос электроэнергии в удаленных общинах предполагается удовлетворять за счет внедрения энергокомплексов на основе ВИЭ, обеспечивающих потребление электроэнергии не более 2500 Вт·ч/сутки. Обобщенная структурная схема типового энергокомплекса, представлена на рисунке 6 и состоит из ветровой энергоустановки (ВЭУ) и солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ), которые подключены к контроллеру заряда (КЗ) аккумуляторных батарей (АКБ). Данная схема предложена Национальной энергетической компанией CORPOELEC как вариант электроснабжения энергодефицитных регионов.

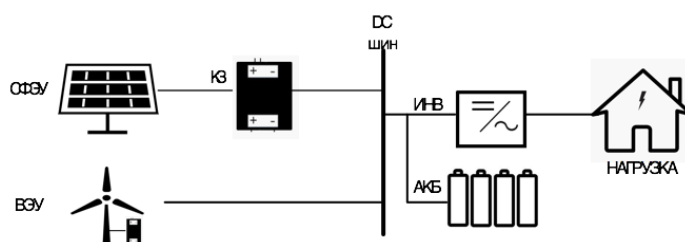


Рис 5. Обобщенная структурная схема энергокомплекса на основе ВИЭ

В таких энергосистемах величина суммарной вырабатываемой энергии энергоустановкой на основе ВИЭ в отдельные периоды может быть в несколько раз выше, чем нагрузка потребителя. В этом случае избыток энергии расходуется на заряд аккумуляторной батареи. Состав оборудования энергокомплекса зависит от располагаемых ресурсов ВИЭ в рассматриваемом районе. Для того, чтобы подобрать оптимально эффективную схему для автономной системы на заданной территории страны, проанализированы возможные конфигурации, которые могут работать в районах с различными особенностями ветро ресурсов и солнечного излучения. Рассмотрены следующие схемы: а) на основе ВЭУ, СФЭУ и АКБ, б) на основе ВЭУ и АКБ и в) на основе СФЭУ и АКБ.

На основании анализа программных продуктов, имеющихся на рынке программного обеспечения, таких как HOMER, RETScreen, ViPOR, LAP, Solar-GIS, Hybrid2, iHoga, PVSol и др. для обоснования параметров систем автономного энергоснабжения на основе ВИЭ была разработана параметрическая схема взаимодействия моделей элементов энергокомплексов (рисунок 6), различных по составу и параметрам. Математическое моделирование выполняется в течение года с интервалом 1 час и последующим формированием оптимальных вариантов для каждой схемы. Структура математической модели энергокомплекса построена с помощью MATLAB.

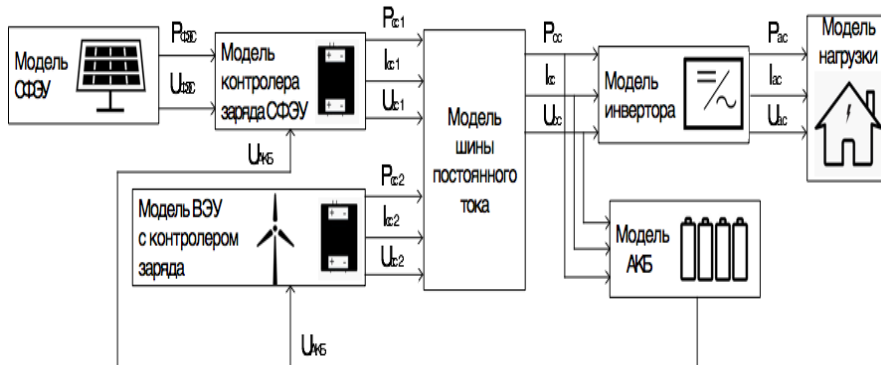


Рис 6. Параметрическая схема взаимодействия математических моделей энергокомплекса на основе ВИЭ

Параметрическая модель ВЭУ с контролером заряда представлена на рисунке 7. Модель ВЭУ построена с использованием характеристик ВЭУ Bonpaу, которые предлагаются компанией CORPOELEC для электроснабжения изолированных потребителей в Венесуэле. На вход модели подаётся значение скорости ветра на высоте ступицы ветроколеса. Расчет мощности происходит по рабочей характеристике ВЭУ.

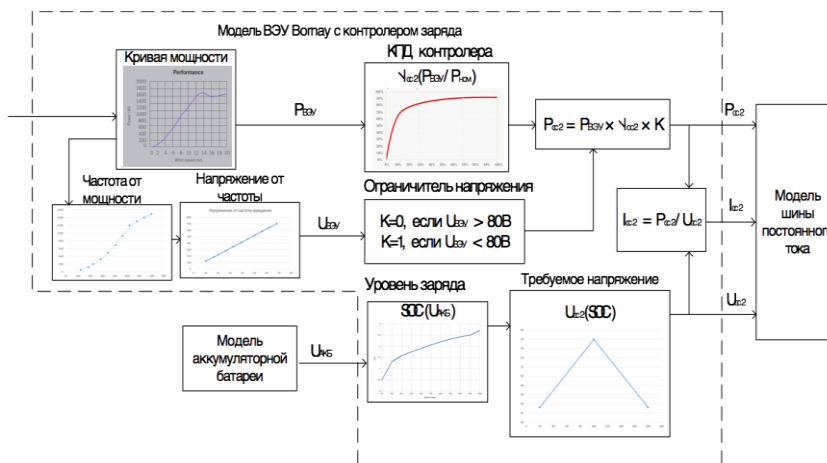


Рисунок 7– Блок-схема модели ВЭУ с контроллером заряда

Модель СФЭУ представляет собой совокупность соотношений, связывающих показатели полезной мощности и КПД с параметрами, характеризующими внутренние характеристики солнечной батареи и внешние условия ее функционирования. Модель АКБ является неотъемлемой частью автономного энергокомплекса и служит для накопления электроэнергии в период избыточной генерации и отдачи ее при дефиците энергии. Количество циклов заряда-разряда определяют реальный срок службы АКБ. Для оценки состояния заряда аккумуляторной батареи предлагается модель на основе методики

Shiffer, которая состоит из 4-х блоков и учитывает потери мощности на коррозию, потери мощности на деградацию и др.

Модель графика нагрузки построена на основе анализа почасовых электрических нагрузок потребителя. Производство электрической энергии энергокомплексом на основе ВИЭ должно быть не меньше, чем ее потребление различными пользователями. Таким образом, график нагрузки определяет минимальную выработку электроэнергии энергокомплексом. Модель системы управления включает процесс получения информации о состоянии подсистем и элементов энергокомплекса, обработки этой информации и передачи управляющих команд с целью регулирования и перераспределения энергии между оборудованием.

Для определения оптимального варианта энергокомплекса разработана методика оценки эффективности проекта, адаптированная к условиям Венесуэлы с учетом принятых заданных критериев и оптимизируемых параметров, блок-схема которой приведена на рис 9. Оптимизируемым критерием выступает нормированная стоимость электроэнергии – Levelized Cost of Energy (LCOE), которая является универсальным показателем и может быть рассчитана для любого объекта генерации электроэнергии. Вопросы оптимизации параметров ЭК на основе ВИЭ, изложены в трудах Бобыля А. В., Велькина В.И., Елистратова В.В., Копылова А. Е., Кудряшевой И. Г., Сидоренко Г. И., Visser E., Held A. и др.

LCOE соответствует долгосрочной цене за 1кВт·ч, обеспечивающей стабильный тариф для потребителей электроэнергии, а инвестору-безубыточность его инвестиций в создание генерирующей технологии, а также приемлемую норму доходности инвестиций, учитываемую в дисконтирующем множителе $(1+r)$. Показатель LCOE для объектов ВИЭ в условиях Венесуэлы определяется по формуле:

$$LCOE_{ВИЭ} = \frac{\sum_{t=0}^T (K_{пт} + O_t + 3_{tCO_2} + 3_{смп} + 3_{зем}) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum \Delta_t}$$

где $K_{пт}$ – капитальные затраты, вложенные в год t , O_t – операционные затраты в год t , 3_{CO_2} – затраты на оплату выбросов парниковых газов в год t , $3_{смп}$ – затраты на строительные-монтажные работы, $3_{зем}$ – стоимость земельного участка под ЭК или альтернативный вариант, Δ_t – количество произведенной электроэнергии в году t , $(1+r)^{-t}$ – коэффициент дисконтирования для года t (дисконтирующий множитель, используемый в расчетах, отражающий прибыль инвестора с учетом различных рисков), T – срок жизненного цикла объекта.

Рис 9. Блок-схема методики оптимизации параметров ЭК на основе ВИЭ

В качестве альтернативного варианта энергоснабжения рассмотрен вариант прокладки ЛЭП до места потребителя. В этом случае $LCOE_{ЛЭП}$ определяется по формуле:

$$LCOE_{ЛЭП} = \frac{\sum_{t=0}^T [K_o + K_q + O_{tлэп} + 3_{тпс} + 3_{смп}] \cdot (1+r)^{-t}}{\sum \Delta_t}$$

где K_o – капиталовложения, определяемые типом опорных конструкции ЛЭП; K_q капиталовложения зависящие от сечения провода и протяженности ЛЭП; $3_{смп}$ – затраты на строительные-монтажные работы; $O_{tлэп}$ – операционные затраты в год t , включают расходы на заработную плату обслуживающего персонала, общесетевые расходы, ремонт оборудования и затраты на потери электроэнергии в электрических сетях

Далее показатель $LCOE_{ВИЭ}$ сравнивается с $LCOE_{ЛЭП}$. Если

$$LCOE_{ВИЭ} - LCOE_{ЛЭП} < 0,$$

выбирается проект реализации ЭК на основе ВИЭ, если

$$LCOE_{ВИЭ} - LCOE_{ЛЭП} > 0,$$

выбирается проект по расширению ЛЭП.

В четвертой главе с целью проверки методики расчета параметров, режимов работы и выбора оптимального варианта системы автономного энергоснабжения, представленной в главе 3, проводятся

исследования эффективности использования энергокомплекса для обеспечения электроэнергией типового потребителя. В качестве примера объектом внедрения предлагаемой в работе методики выбрана сельская местность Керепаре штата Сукре, Венесуэла, которая не располагает доступом к таким услугам, как питьевая вода, система сточных вод и электричество. Населенный пункт Керепаре площадью около 10 млн м² находится в штате Сукре на территории Национального Парка с координатами 10° 26' 18,3 северной широты и 63° 09' 54.2 западной долготы.

Данный район отличается высокой плотностью ветроэнергopotенциала и солнечной радиации (рис 11а, б).

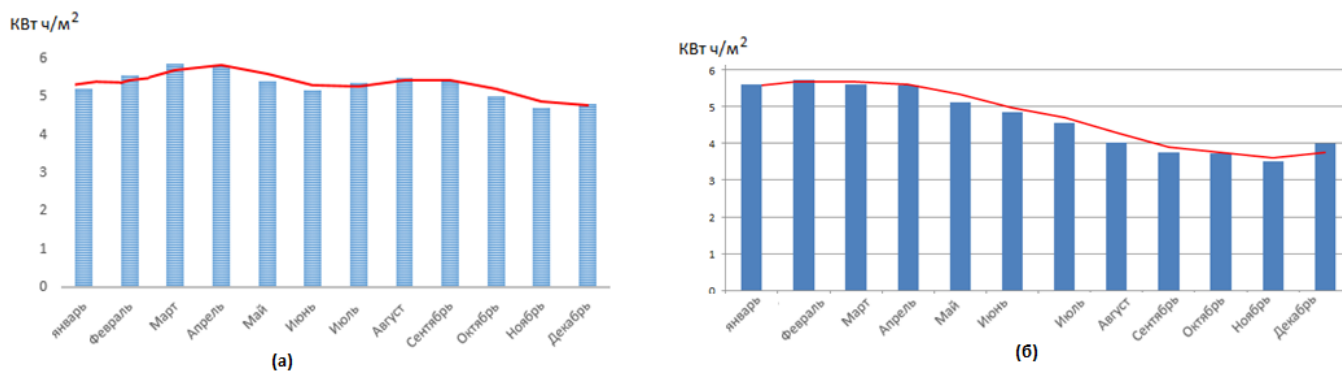


Рисунок 11 - Распределение солнечного (а) и ветрового (б) ресурса в общине Керепаре

В таблице 2 представлено основное электрооборудование и объем потребления в Вт·ч для типового домохозяйства.

Таблица 2- Структура ежедневного потребления энергии одним на домохозяйством

Приборы	Количество	Мощность, Вт	Продолжительность использования, ч	Суточное Потребление, Вт·ч
Лампа коридора	1	15	11	165
Лампы комнаты	3	15	4	180
Остальные лампы	3	15	1	45
Холодильник	1	110	24	1320
Радио	1	50	3	150
Блендер	1	250	0,083	20,83
Телевизор	1	60	5	300
Ресивер ТВ	1	15	5	75
Зарядное устройство	1	4	2	8
Всего				2264

Суммарное годовое потребление электроэнергии общиной составляет 826 кВт·ч/год. Вследствие обеспечения государством каждой общины однотипным электрооборудованием необходимое потребление является примерно одинаковым для каждой общины. Согласно социалистическому плану Симон Боливар инновационное обеспечение общин электроэнергией на основе ВИЭ должно предусматривать запас, составляющий 40 % от годового потребления энергии. В связи с этим необходимо предполагать, что годовое потребление общины в год будет составлять 1162 кВт·ч.

Политика венесуэльского государства, в частности, Министерства народной власти по электроэнергии, ориентирована на обеспечение электроэнергией населения, необходимого качества и количества по гарантированной цене. Для достижения этой цели в 2006 году были установлены связи с Испанским агентством международного сотрудничества в целях развития (AECID).

В рамках имитационного моделирования режимов работы ЭК на первом этапе были исследованы варианты ЭК со следующим составом: В1- солнечная фотоэлектрическая установка с разным количеством солнечных модулей (СМ), аккумулятор с разным количеством АКБ, инвертор и контролер заряда; В2- ветроустановка из нескольких ВЭУ, аккумулятор с несколькими АКБ, инвертор и контролер заряда; В3- гибридная схема с несколькими СФЭУ и ВЭУ, аккумулятором,

инвертором и контроллером заряда. Для каждого варианта были проведены расчеты, после чего был отобран вариант Вопт, который с наименьшим превышением покрывает годовой график нагрузки и обеспечивает энергопотребление в месячном и суточном интервалах на основе знаний о приходе солнечной и ветровой энергии на этих интервалах. В результате рассмотрения и оптимизации состава схем В1, В2, В3 выбраны оптимальные составы для каждого варианта энергокомплексов (табл 3):

Таблица. 3 – Варианты оптимальных составов энергокомплексов на ВИЭ

Вариант	Компоненты системы	Потребление (кВт-ч/год)	Выработка ЭК(кВт-ч/год)	Разница между выработкой и потреблением (%)	СМ, шт	ВЭУ, шт	АКБ кол-во ячеек	Инвертор, шт	Контроллер заряда, шт	Стоимость оборудования, \$
В1_{опт}	СФЭУ, АБ, Инв	1162	1457	25	5	0	12	1	1	3475
В2_{опт}	ВЭУ, АБ, Инв	1162	1693	46	0	2	24	1	1	13190
В3_{опт}	СФЭУ, ВЭУ, АБ, Инв	1162	1427	23	2	1	12	1	1	7569

Все три варианта обеспечивают годовую выработку энергопотребления общиной. Разница в произведённой и потребляемой энергией объясняется необходимостью компенсации различия между потреблением и реальным приходом ресурсов ВИЭ в течение года. Первый вариант схемы энергокомплекса имеет разницу +25 % между выработкой и потреблением в год. Во втором варианте схемы энергокомплекса приходится использовать 2 ВЭУ для обеспечения необходимого потребления в год. При этом в этой схеме разница между выработкой и потреблением становится слишком большой и составляет +46 %. Третья схема, предполагающая использование как СФЭУ, так и ВЭУ, имеет наименьшую разницу между выработкой и годовым потреблением электроэнергии +23 %. Для компенсации разницы между потреблением и реальной выработкой в течение суток все три схемы энергокомплексов предполагают использование АКБ. Например, в течение влажного сезона наблюдается снижение вырабатываемой энергии от ВИЭ. Использование АКБ позволяет общине быть обеспеченной энергией автономно в течение 4 дней. Избыточная вырабатываемая энергия – свыше потребляемой – запасается в АКБ.

Оптимальный вариант системы электроснабжения определялся из сравнения вариантов **В1_{опт}**, **В2_{опт}**, **В3_{опт}** на основе минимизации LCOE.

Таблица. 4 - Стоимость оборудования

Оборудование	Стоимость (\$)
Солнечный модуль (СМ) А-160, мощность 160 Вт	152
Ветрогенератор Bonay (ВЭУ) 1500, мощность 1500 Вт	4550
Аккумуляторная батарея (АКБ) OPzS (12 В)	1335
Контроллер заряда Leo	487
Инвертор Tauro	893

В соответствие с оценкой экономической эффективности вариантов энергокомплексов по критерию $LCOE \rightarrow \min$ по каждому варианту электроснабжения рассчитываются затраты на экологические (выбросы CO_2) и социальные (изъятие земель) факторы, тарифы на электроэнергию, налоговое окружение, льготы, а также возможные риски и схемы финансирования на протяжении всего жизненного цикла объекта. При этом для условий Венесуэлы количество выбросов CO_2 для производства 1 кВт·ч на ВИЭ составляет от 0,032 до 0,082 кг и оценивается в 2\$ за тонну. Капитальные затраты, вложенные в год t определяется как сумма стоимости оборудования ЭК. Операционные затраты в год t определяются в размере 3-5 %, затраты на строительные-монтажные работы определяются в размере 12-15 % от стоимости первоначальных инвестиций в оборудование. Стоимость земли, отводимой под энергокомплекс, определяется стоимостью ее 1 м² в размере 35\$. Согласно полученным результатам (табл. 5) оценены затраты экономическим, экологическим и социальным факторам для расчета LCOE для каждого варианта электроснабжения.

Таблица. 5 - Затраты для каждого варианта электроснабжения

Варианты	$K_{прt}$ (\$)	O_t (\$)	Z_{tCO2} (\$)	$Z_{стр}$ (\$)	$Z_{зем}$ (\$)	$LCOE_{ВИЭ}$ (\$/кВт·ч)
B1	3475	105	0,15	521,25	525	3.17
B2	13150	328,75	0,18	1972,5	630	9.00
B3	7569	302,76	0,14	1135,35	875	6.93

Наиболее эффективным вариантом производства электроэнергии является вариант, который соответствует минимуму суммарных дисконтированных затрат. В этом случае LCOE - это показатель минимальных удельных дисконтированных затрат на производство электроэнергии.

В соответствии с альтернативным вариантом энергоснабжения может быть проведена прокладка ЛЭП до места энергоснабжения. Учитывая, что капиталовложения, определяемые конструкцией ЛЭП и зависящие от сечения и материала провода, составляют 125000 \$. Операционные затраты ($O_{т.лэп}$), которые включают расходы на заработную плату обслуживающего персонала, общесетевые расходы, ремонт оборудования и затраты на потери электроэнергии в электрических сетях варьируется 6-8 % от стоимости первоначальных инвестиций в оборудование. Затраты на подстанцию ($Z_{тнс}$) составляют 2 % от стоимости первоначальных инвестиций в оборудование.

На рисунке 13 показаны различные значения LCOE для каждого рассматриваемого варианта электрификации с ВИЭ которые имеют значения: 3,17, 9 и 6,93 \$/кВт·ч

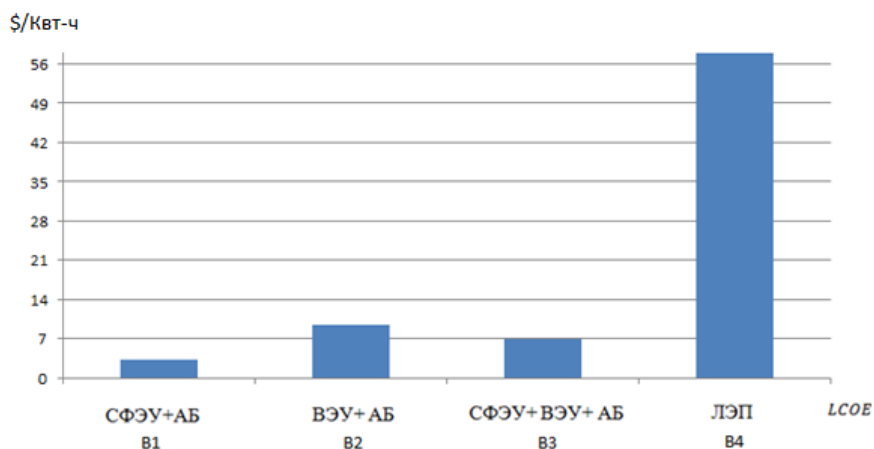


Рис 13- LCOE по вариантам электроснабжения общины Керепаре

Оптимальной схемой производства электроэнергии на основе ВИЭ с учетом минимального значения LCOE является первый вариант (СФЭУ+АБ), который имеет LCOE равный 3,17 \$/кВт·ч,. В результате расчетов по обоснованию проекта энергокомплекса на базе $LCOE \rightarrow \min$ к условиям

Венесуэлы наилучшим решением электрификации данной общины Керепаре является внедрение фотоэлектрических автономных систем, которые имеют социальные и экономические преимущества по сравнению с другими способами электроснабжения, не приводят к вырубке лесов и в наименьшей степени оказывают влияние на окружающую среду. В рассмотренном случае $LCOE_{ВИЭ} - LCOE_{ЛЭП} < 0$, поэтому выбирается проект реализации ЭК на основе ВИЭ. Загруженность фотоэлектрической установки определяется как отношение среднего объема выхода энергии в кВт·ч/день к первоначальному среднему объему нагрузки, что показывает, что система может удовлетворить более 100% нагрузки. Аккумуляторные батареи представляют незаменимую часть автономной системы электрификации и предназначены для бесперебойного генерирования электроэнергии, поскольку накапливают энергию, исходящую из возобновляемых источников на протяжении дня для дальнейшего ее использования в моменты, когда источник (в данном случае солнечная батарея) не производит достаточно энергии, а также в случае повреждения СФЭУ и других компонентов энергокомплекса.

Таким образом, оптимизация схемы электроснабжения с точки зрения обеспеченности ресурсами ВИЭ в данном месте позволяет повысить долю использования возобновляемых ресурсов в ЭК, снизить суммарные затраты на систему, а также улучшить экологическую обстановку окружающей среды, заменяя электроэнергию от ЛЭП чистой электроэнергией от ВИЭ.

В заключении по результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ состояния и острых проблем электроснабжения населенных пунктов в децентрализованных районах Венесуэлы показал, что эффективным решением может явиться использование энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии.
2. Разработана методика оценки валовых и технических ресурсов ветровой и солнечной энергии для условий Венесуэлы с использованием трехуровневого подхода, мезомасштабного моделирования и баз данных спутниковых наблюдений за метеорологическими характеристиками.
3. Впервые выполнена оценка потенциала ВИЭ и созданы атласы солнечного и ветрового потенциала для всей территории Венесуэлы, выявлены наиболее перспективные зоны использования этих ресурсов для генерации электроэнергии.
4. Общий технический потенциал ветровой энергии Венесуэлы оценен в 1639 ТВт·ч/год, общий технический потенциал солнечной энергии – 4980 ТВт·ч/год.
5. Разработаны модели оборудования ЭК на основе ВИЭ с помощью программы MATLAB и проведено моделирование системы электрификации одной из общин на северо-востоке Венесуэлы.
6. Предложена инженерная методика обоснования параметров и режимов работы энергокомплексов на ВИЭ для условий Венесуэлы на основе знаний о природно-климатической информации в месте размещения и имитационного моделирования.
7. Проведенная технико-экономическая оценка энергосистемы на основе ВИЭ для электроснабжения потребителей в общине Керепаре по критерию $LCOE \rightarrow \min$ показала, что эти значения могут изменяться в диапазоне 3,0 – 9,0 \$/кВт·ч, что значительно ниже, чем $LCOE_{ЛЭП} = 58$ \$/кВт·ч, и тем самым подтвердила экономическую целесообразность строительства систем электроснабжения в децентрализованных районах на основе ВИЭ.
8. Создание энергокомплексов на ВИЭ будет способствовать реализации национального проекта «Симон Боливар» и повышению энергоэффективности и экологической безопасности индивидуального энергоснабжения удаленных приграничных территорий Венесуэлы.

Публикации по теме диссертационной работы:

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и SCOPUS:

1. Контрерас М.В. Методика оценки ресурсов ВИЭ Венесуэлы// Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 56-61.
2. Елистратов В.В., Контрерас М.В. Technical evaluation of the wind resource in Venezuela// ARPN Journal of engineering and applied sciences. – 2016.- Vols. 11.- Pp. 4399-4403.

Доклады в сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ:

1. Victor Vasilevich Elistratov and Marisabel Contreras. Evaluacion tecnica del recurso eolico en Venezuela// XII World wind energy conference renewable energy exhibition. Havana. Cuba.2013.
2. Елистратов В.В., Контрерас М. Расчет параметров солнечных фотоэлектрических установок с использованием программы PVSOL // В сборнике: Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR - 2014 М., С. 160-162.
3. Контрерас В.М., Елистратов В.В., Кудряшева И.Г. Методические подходы к оценке эффективности энергокомплексов на ВИЭ в Венесуэле// V Международная конференция «Возобновляемая энергетика: Проблемы и Перспективы», г. Махачкала 2017 г.
4. Контрерас М., Елистратов В.В. Развитие электроэнергетики в Венесуэле //В сборнике: XLI неделя науки СПбПУ Материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб; изд. Политехнического университета 2012. С. 98-100.
5. Контрерас М.В. Использование программного обеспечения PVSOL expert для проектирования фотоэлектрических систем // Сборник докладов молодежной научно-практической конференции в рамках Недели науки СПбПУ. СПб, изд. Политехнического университета 2014. С. 15-17.
6. Елистратов В.В., Контрерас М. Оценка ветрового потенциала Венесуэлы для проектирования ВЭС // В сборнике: XLII Неделя науки СПбПУ. СПб, изд. Политехнического университета 2014. С. 17-20.
7. Контрерас М.В. Обоснование критериев оптимизации состава оборудования в энергокомплексах на основе ВИЭ для условий Венесуэлы // В сборнике: XLIII Неделя науки СПбПУ. СПб, изд. Политехнического университета 2015. С. 216-218.

Диссертационная работа выполнена в рамках договора об оказании образовательных услуг в области новых энергетических технологии между Российской Федерацией и Боливарианской Республикой Венесуэла от 2010 года при поддержке компании CORPOELEC.

Исследования выполнены в научно-образовательном центре «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбПУ П в рамках проекта ФЦП Минобрнауки «Разработка методов и интеллектуальных технологий автономного энергоснабжения на основе традиционных и возобновляемых источников энергии».