

На правах рукописи

**Кортес Лилиана**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО  
ЭНЕРГОВОДОСНАБЖЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ  
(ДЛЯ УСЛОВИЙ МЕКСИКИ)**

Специальность 05.14.08

Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург  
2004

Работа выполнена на кафедре возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Елистратов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
Грилихес Владимир Александрович  
- кандидат технических наук, ст.н.с.  
Попель Олег Сергеевич

Ведущая организация Московский энергетический институт (Технический университет)

Защита состоится «    » \_\_\_\_\_ 2004 г в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт– Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт – Петербург, Политехническая ул., 29, гидрокорпус – 2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Орлов В. Т

**Актуальность темы.** Энергетическая проблема – одна из важнейших мировых проблем современности и затрагивает самым непосредственным образом развивающиеся страны Латинской Америки, Азии и Африки. Недостаточность производства электроэнергии, ее дороговизна сдерживают не только создание промышленности и перерабатывающих отраслей в сельском хозяйстве этих стран, но и развитие в целом. В Мексике 20% населения, в основном сельских районов, не имеет устойчивого электроснабжения, дефицит энергии составляет около 36 ТВт·ч в год. Предполагается, что к 2020 г. процент населения, не обеспеченного электроэнергией, увеличится по причине того, что выработка электроэнергии растет с темпом демографического роста.

В Мексике, несмотря на то, что есть большие запасы нефти и газа, в связи с повышением потребления электроэнергии и стремлением к технологической независимости, уделяется большое внимание развитию и внедрению возобновляемых источников энергии. По отчётам Министерства Энергетики Мексики за 2002 год общая установленная мощность составляет 43534 МВт, планируется повышение мощности к 2010 году еще на 32000 МВт. Часть необходимой энергии планируется вырабатывать на частных предприятиях. «Реформа Индустрии в Мексике» 1992 года разрешает производить электроэнергию для собственных нужд децентрализованно от установок мощностью до 30 МВт, что позволило в настоящее время производить 21.2% всей энергии.

Обилие солнечной энергии в Мексике и острота проблемы энергоснабжения, постоянное повышение тарифов на электроэнергию делают проблему создания эффективных и рентабельных систем электроснабжения на основе солнечных энергоустановок для автономных потребителей особенно актуальной, тем более что в стране формируются предпосылки для децентрализации энергоснабжения. Такие системы должны быть надёжными, автоматизированными, простыми в эксплуатации, иметь большой срок службы и одновременно давать возможность решать проблему водоснабжения.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы определяется тенденциями развития энергетики Мексики и необходимостью разработки систем энерго- и водоснабжения для удаленных от централизованных энергосистем потребителей малой мощности, что обеспечивает высокий социальный эффект и минимальное воздействие на окружающую среду.

**Цель диссертации** заключается в разработке методики научного обоснования параметров и структуры солнечной автономной системы электроводоснабжения (СЭВС), рассчитанной на различный уровень энерго- и водопотребления в условиях Мексики.

**Основные задачи исследования** Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обобщен и оценен теоретический потенциал нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Мексики для использования в электроэнергетике;
- усовершенствована математическая модель прихода солнечной радиации применительно к территории Мексики, которая позволяет прогнозировать энергетический потенциал солнечной радиации;
- разработана методика определения ориентации приемной поверхности солнечной батареи (СБ), обеспечивающий согласование годового графика выработки солнечной энергии с графиком нагрузки;
- определены графики энерго- и водопотребления для конкретных местностей и типов потребителей в Мексике;
- выполнен системный анализ по определению параметров СЭВС, включающий оптимизацию поступления солнечной энергии (СЭ) на поверхность СБ, выбор параметров оборудования, отбор максимальной мощности системы «Солнечная батарея-аккумуляторная батарея (АБ)», эффективную работу насосов;
- осуществлен анализ работы системы электроводоснабжения для четырех характерных структурных вариантов СЭВС и проведено их технико – экономическое сопоставление;
- разработан алгоритм автоматического управления СЭВС, который обеспечивает оптимальную работу всей системы автономного электроводоснабжения.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- Впервые определен удельный валовый потенциал солнечной энергии регионов Мексики с учетом характеристик рельефа.
- Предложена методика определения ориентации приемной площадки СБ, обеспечивающий выравнивание годового графика выработки электроэнергии.

- Разработан алгоритм определения максимальной выходной мощности СБ в зависимости от степени относительной заряженности АБ (Q).
- Исследованы переходные процессы пуска двигателя насоса системы водоснабжения при его питании от СБ и предложены альтернативные варианты схемы его подключения.
- Впервые проанализирована эффективность применения принципов гидроаккумуляции солнечной энергии для автономного потребителя малой мощности в условиях Мексики.
- Разработан алгоритм управления СЭВС, обеспечивающий выполнение заданного графика нагрузки с минимальными затратами.

**Практическая значимость работы.** Результаты выполненного исследования предназначены для использования при проектировании систем автономного энерговодоснабжения потребителей малой мощности в условиях Мексики. Использование рекомендаций автора на стадии проектирования позволит повысить конкурентоспособность и экономическую эффективность систем энерговодоснабжения на основе солнечных энергоустановок, что крайне важно для улучшения экологической и социальной обстановки в энергодефицитных районах.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- результаты оценки валового потенциала нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Мексики;
- усовершенствованная математическая модель прихода солнечной радиации применительно к территории Мексики;
- обобщенный алгоритм по определению параметров СЭВС, включающий оптимизацию поступления СЭ на поверхность СБ, выбор параметров оборудования, отбор максимальной мощности системы «СБ-АБ» и эффективную работу насосов;
- результаты технико-экономического сопоставления четырех характерных вариантов структуры СЭВС;
- алгоритм автоматического управления для обеспечения оптимальной работы системы автономного электроводоснабжения.

**Апробация работы** Основные положения диссертации доложены и одобрены семинарах кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического

университета и кафедры индустриальной электроники Прославленного автономного университета города Пуэбла, на международных конференциях: «Возобновляемая энергетика-2003» С-Петербург; «Электроника-2002» Мексика 2002), «Экобалтика» С-Петербург 2004.

**Достоверность полученных результатов** Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и не противоречат известным и апробированным методам и подходам.

**Личный вклад автора** В ходе научных исследований автором лично получены результаты теоретического и прикладного характера. Обобщен и оценен валовый потенциал НВИЭ Мексики; разработана методика определения ориентации приемной поверхности СБ; выполнен системный анализ по определению параметров СЭВС, осуществлен анализ работы системы электроводоснабжения для четырех характерных вариантов структуры СЭВС и сделано их технико-экономическое сопоставление; создан алгоритм автоматического управления СЭВС.

**Структура и объем работы** Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 74 наименований. Работа изложена на 147 листах машинописного текста и содержит 54 рисунка и 28 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи исследований, приводятся сведения о научной новизне и практической ценности работы, апробации разработок и исследований.

**Первая глава** посвящена оценке современного состояния и перспектив развития нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) в Мексике. Рассмотрены основные достижения в Мексике по использованию солнечной радиации, ветра, малых ГЭС, биомассы, геотермальной энергии и другие. Анализ состояния и перспектив развития НВИЭ в Мексике показал, что страна обладает большим потенциалом возобновляемых ресурсов, которые используются только частично. Мексике необходимо покрыть имеющийся дефицит электроэнергии, в основном для удаленных и изолированных потребителей, а также развить собственные технологии в области НВИЭ. Для решения этой задачи автор предлагает разработку и оптимизацию автономных систем энергоснабжения, которые решают одновременно проблему

водоснабжения. Наиболее целесообразным является использование для этих целей солнечной энергии, потенциал которой весьма значителен и позволяет обеспечить круглогодичную эксплуатацию системы энерговодоснабжения.

Дан анализ климата Мексики по данным метеорологических станций. Определены валовые ресурсы солнечной энергии в помесячных интервалах для характерных регионов Мексики (рис.1) и выявлено, что среднемесячный приход колеблется в течение года в диапазоне 14-26 МДж/м<sup>2</sup>. На основании природно-климатических особенностей Мексики и характера прихода ресурсов СЭ автором предложено разделить территорию Мексики на три характерных зоны: пустынную, высокогорную и прибрежную. В каждой зоне подробно исследованы ресурсы СЭ. Анализ данных наблюдений прихода солнечной радиации использован для коррекции его математической модели.

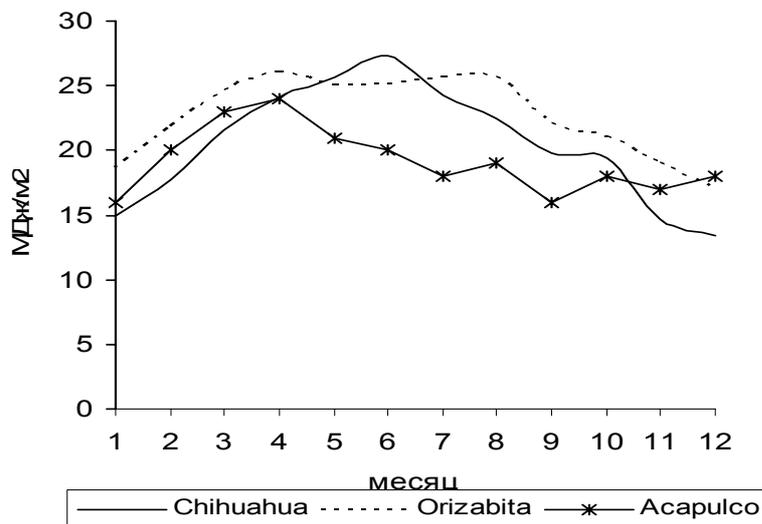


Рис.1 Среднемесячный приход СЭ на основании данных наблюдений.

(Чигуауа-пустынная зона 13-27 МДж/м<sup>2</sup>; Оризавита-высокогорная зона 17-26 МДж/м<sup>2</sup>; Акапулько-прибрежная зона 16-24 МДж/м<sup>2</sup>)

Анализ публикаций показал, что в основном исследования и разработки систем энерговодоснабжения направлены либо на электроснабжение, либо на водоснабжение. Для Мексики, ввиду традиционно сложившейся инфраструктуры децентрализованного водоснабжения, является актуальным создание комплексной системы энерговодоснабжения. Работ по исследованию и разработке таких систем для условий Мексики не обнаружено.

**Во второй главе** дана методика моделирования текущего прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность и пересчета на наклонную поверхность. Выполнено сопоставление моделей оценки прихода солнечной

радиации, предложенные Даффи, Бекманом, Лю и Джорданом, Хотелом и с учетом введения коэффициентов ослабления внеатмосферной радиации ( $\tau_{\Sigma}$ ) применительно к территории Мексики. Этими вопросами занимались В.А.Гриликес, Махмуд У. Джасим и другие.

Автором для учета ослабления солнечного излучения, в условиях резкопересеченного рельефа Мексики, на основании эмпирического уравнения Кальдаса, предложена формула для определения фактической атмосферной массы ( $m_{\phi}$ )

$$m_{\phi} = m_e \frac{h}{8631.56} \quad (1)$$

где  $h$  - высота места над уровнем моря,  $m$ ;  $m$  - масса атмосферы на уровне моря.

Коэффициент ослабления  $\tau_{\Sigma} = \tau_{O_3} \cdot \tau_{\text{газ}} \cdot \tau_{H_2O} \cdot \tau_R \cdot \tau_A$  определен с использованием значений частных коэффициентов ослабления прямого солнечного излучения газами и частицами атмосферы, предложенный Икьюбалом:

$$\tau_{O_3} = 1 - \frac{0,0516 \cdot m_{\phi}}{(1 + 44,634m_{\phi})^{0,3035}} ; \tau_{\text{газ}} = \exp(-0,0127 \cdot m_{\phi}^{0,26});$$

$$\tau_R = \exp(-0,0903m_{\phi}^{0,84}) ; \tau_A = \exp(-0,095m_{\phi}^{0,9}); \quad (2)$$

$$\tau_{H_2O} = 1 - \frac{2,496d_{H_2O} \cdot m_{\phi}}{6,385d_{H_2O} \cdot m_{\phi} + (1 + 79,03d_{H_2O} \cdot m_{\phi})^{0,683}}.$$

Где  $\tau_{O_3}$ ;  $\tau_{\text{газ}}$ ;  $\tau_{H_2O}$ ;  $\tau_R$ ;  $\tau_A$  - частные коэффициенты пропускания за счет поглощения озоном, атмосферными газами, парами воды, релеевского и аэрозольного рассеяния соответственно;  $d_{H_2O}$  - плотность паров воды.

Плотность энергии прямого ( $W_b$ ) и диффузного ( $W_d$ ) солнечного излучения на горизонтальную площадку рассчитан, как

$$W_b = \int_{t_{\text{восх}}}^{t_{\text{зах}}} E_{\text{гор}}^0(t) \cdot \tau_{\Sigma} dt ; \quad W_d = \int_{t_{\text{восх}}}^{t_{\text{зах}}} E_{\text{гор}}^0(t) \cdot 0,38(1 - \tau_{\Sigma}) dt \quad (3)$$

где  $E_{\text{гор}}^0(t)$  - плотность внеатмосферной солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Для определения прихода суммарной солнечной радиации, падающей на наклонную поверхность ( $W_T$ ) в краткосрочные интервалы времени,

выполнен пересчет трех составляющих излучения: прямой, зависящей от атмосферной массы, рассеянной и отраженной радиации с использованием модели Лю и Джордана.

$$W_T = W_b \cdot R_b + W_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + (W_b + W_d) p_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4)$$

где  $R_b$  - представляет отношение прихода, падающего по нормали на наклонную поверхность, к приходу, падающему на горизонтальную поверхность;  $p_g$  - отражающая способность поверхности земли.

Модель была проверена и скорректирована по фактическим данным метеостанций и обеспечивает хорошую сходимость результатов.

Для согласования прихода солнечной энергии с графиком нагрузки выполнены исследования по определению оптимального угла наклона зафиксированной СБ. Для этого были использованы:

- критерий максимизации годового прихода солнечной радиации

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_{\text{мес.}i} \rightarrow \max, \quad (5)$$

- критерий выравнивания годового прихода солнечной энергии на поверхность СБ

$$\Delta H = \sum_{i=1}^{12} |H_{\text{ср.}} - H_{\text{мес.}i}| \rightarrow \min \quad (6)$$

Как показали расчеты, для выполнения критерия (5) угол наклона СБ может приниматься равным и более широте местности, так как при таких значениях  $\beta$  годовой приход солнечной энергии остается практически постоянным (рис.2).

Критерий (6) сформулирован с учетом особенностей климата Мексики и представляет собой требование минимальности суммы абсолютной разницы между среднегодовым значением прихода солнечной радиации ( $H_{\text{ср.}}$ ) и среднемесячным значением ( $H_{\text{мес.}i}$ ).

Критериальное уравнение (6) выполняется при угле наклона  $\beta$ , равном  $38^\circ$  (рис.2).

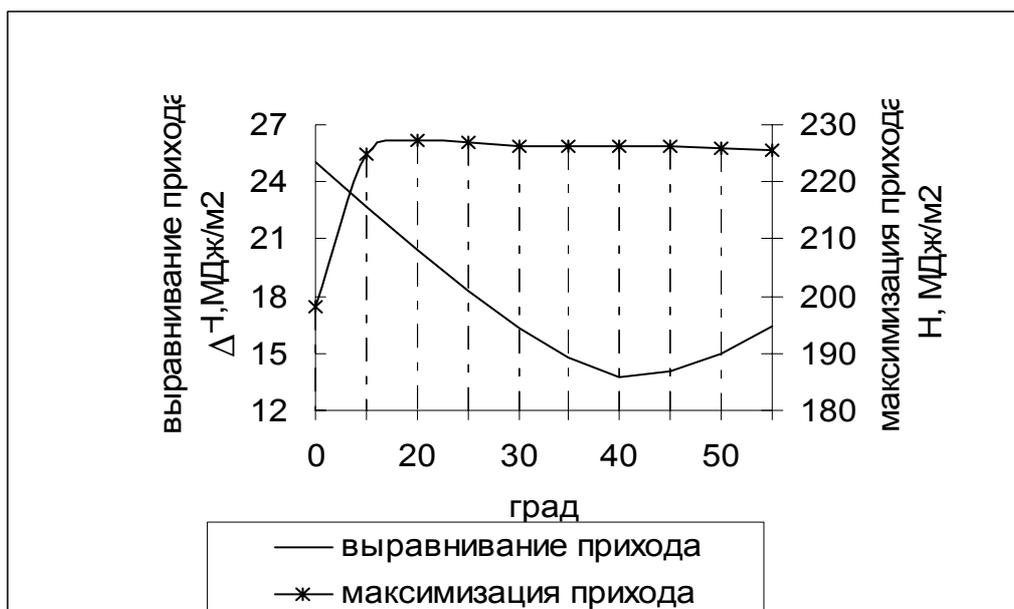


Рис.2 Определение оптимального угла наклона СБ

С использованием предложенных критериев выполнены расчеты прихода солнечной энергии на наклонную площадку, расположенную под разными углами (рис.3). Показано, что наиболее эффективным углом наклона СБ является угол  $\beta=38^\circ$ , так как при этом значении кривая прихода энергии наиболее близка к графику нагрузки.

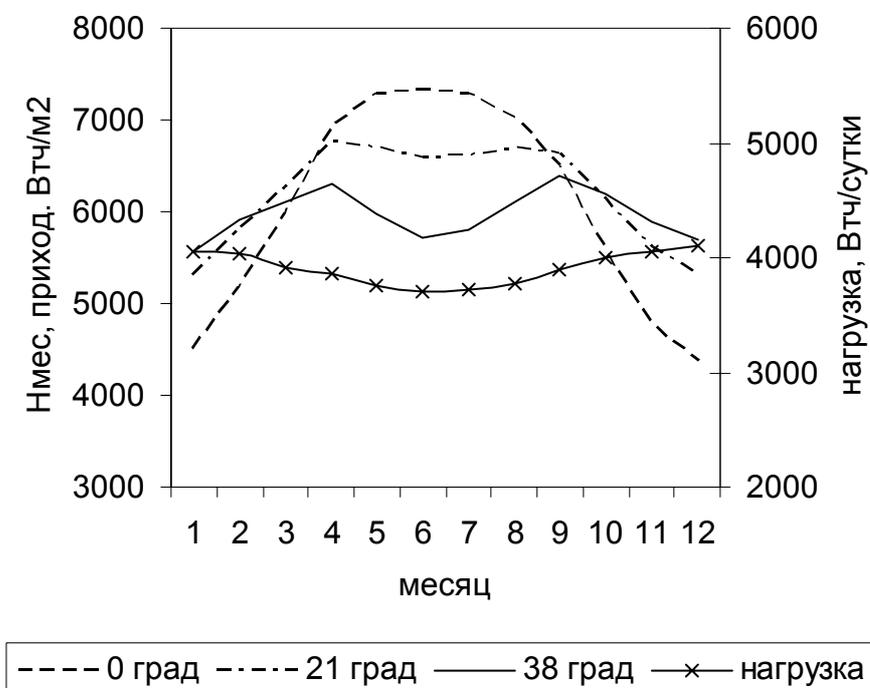


Рис.3 Приход на наклонную площадку на примере центральной части Мексики.

**В третьей главе** рассмотрены методические принципы отбора максимальной мощности солнечной батареи в составе СЭВС. По типовым ВАХ выбранного модуля MSW-36(12) построены зависимости выходной мощности от тока модуля при переменной интенсивности солнечного излучения ( $E$ ). Для каждого значения ( $E$ ) определены значения оптимального тока ( $I_{СБопт}$ ), при котором СБ отдает максимальную мощность ( $P_{СБmax}$ ) и которое заносится в память микроконтроллера системы управления. Разница между этим значением и текущим значением тока формирует управляющий сигнал для силового контроллера в виде вольтодобавочного напряжения ( $\Delta U_{ВД}$ ), который представляет собой разницу напряжений между солнечной ( $U_{СБ}(t)$ ) и аккумуляторной ( $U_{АБ}(t)$ ) батареями

$$\Delta U_{ВД}(t) = U_{СБ}(t) - U_{АБ}(t). \quad (7)$$

Условием отдачи максимальной мощности СБ является баланс мощности на клеммах силового контроллера (СК)

$$P_{СБmax} = U_{АБ}(I_{нагр} + I_{АБ}) / \eta_{СК} \quad (8)$$

где  $I_{нагр}$ ;  $I_{АБ}$  - ток нагрузки и АБ соответственно,  $A$ ;  $\eta_{СК}$  - КПД СК.

Поддержание СЭВС в режиме отдачи максимальной мощности обеспечивается системой управления (СУ). Для определения оптимальной функциональной схемы СУ и выполнения условия (8) изучено изменение параметров эквивалентной нагрузки и аккумулятора.

Разработана методика диагностики состояния АБ, как управляющего элемента системы управления. Для обеспечения оптимальных по отдаче энергии режимов работы СБ исследована совместная работа системы СБ-АБ. Установлено, что оптимизация отбора мощности не может осуществляться при приближении к предельному состоянию разряда АБ ( $Q_{АБ} \leq 0.2$ ), поэтому система управления поэтапно отключает часть нагрузок потребителя. В режиме предельного заряда ( $Q_{АБ} \geq 0.9$ ) предусматривается перераспределение энергии на дополнительную нагрузку (ДН) (например бойлер или ТЭН в системе горячего водоснабжения). Действия системы управления являются функцией степени относительной заряженности (разряженности) батареи  $Q_{АБ}$  и для определения ее текущего значения используется метод интерполяции.

С целью согласования процесса производства энергии и потребления исследованы основные типы потребителей автономной системы электроснабжения и оценены пределы необходимой установленной мощности.

Отмечено, что в условиях Мексики кроме обычной нагрузки необходимо также учитывать подключение двигателя насоса, предназначенного для водообеспечения дома. Найдена зависимость между площадью дома и средней суточной нагрузкой СЭВ для типовых коттеджей.

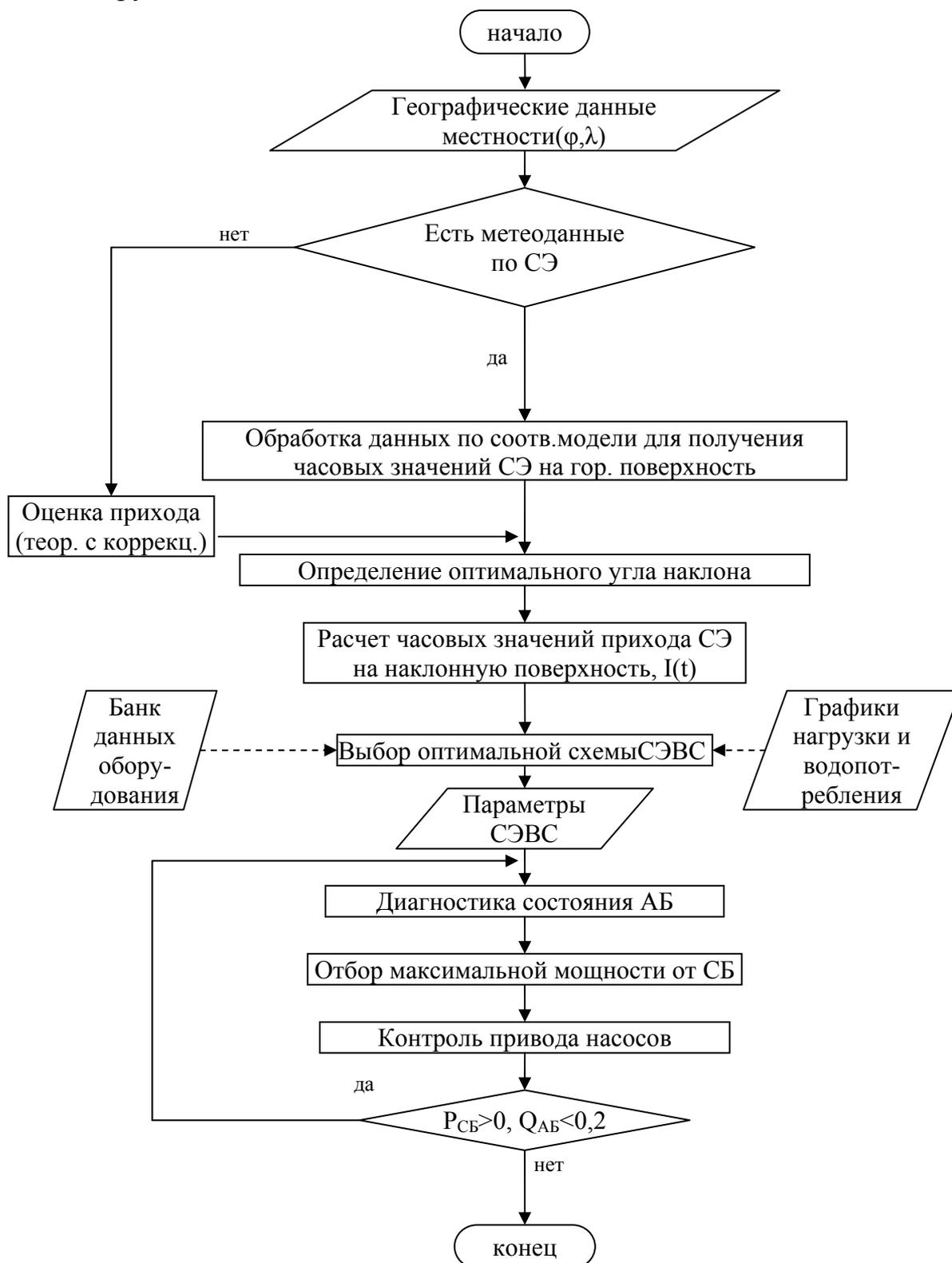


Рис.4 Общий алгоритм оптимизации работы СЭВС.

Последующие исследования проведены на примере типового дома площадью  $50\text{ м}^2$  с общим суточным потреблением электроэнергии  $W_{\text{потр}}=3600$  Вт·ч и расходом воды около  $2\text{ м}^3$  в сутки. Установлено, что в этом случае мощность СБ составляет 1000-1400 Вт, емкость АБ около 100 А·ч, мощность инвертора 600-800 Вт и мощность двигателя насоса около 600 Вт.

Для обеспечения оптимальной работы СЭВС разработана система управления, алгоритм которой представлен на рис.4. Предложенная система позволяет прогнозировать режим работы СЭВС и обеспечивает оптимальную работу системы при заданной освещенности, требуемом графике электро- и водопотребления и заданном составе оборудования. Применение системы управления для конкретной СЭВС, взятой как типовой пример уменьшает емкость АБ на 20%, увеличивает выработку электроэнергии СБ на 10%, что в конечном итоге уменьшает площадь установленных солнечных модулей и общие затраты.

**Четвертая глава** посвящена исследованию взаимосвязей элементов системы энерговодоснабжения (СЭВС).

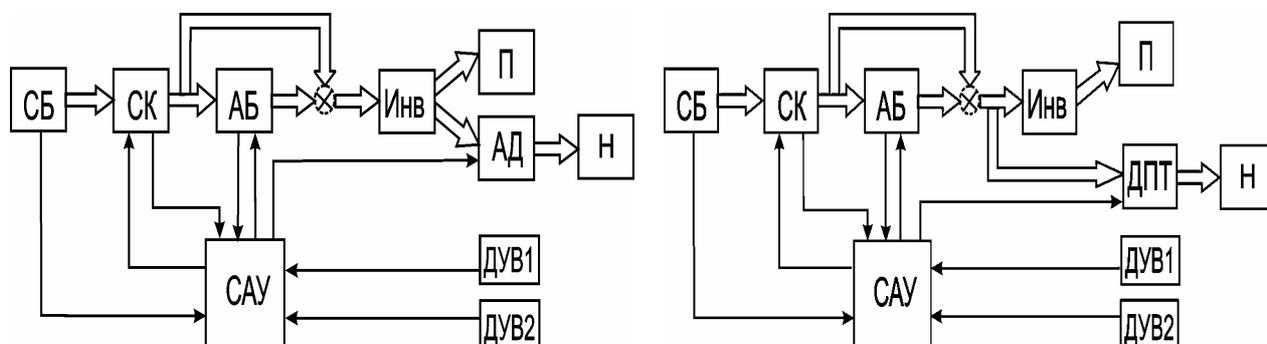
Исследованы ряд характерных структурных вариантов СЭВС отличающихся составом оборудования, типами приводного двигателя, схемами присоединения к СБ, принципами аккумулирования энергии и др. (рис.5).

Для варианта №1 с асинхронным двигателем (АД) не требуется дополнительного комплекса оборудования, обеспечивается высокое качество электроэнергии и бесперебойность электроснабжения потребителей (П). В то же время для этого варианта необходимо использовать инвертор (Инв.) повышенной мощности, который большую часть времени будет работать с низким КПД.

В варианте №2 с двигателем постоянного тока (ДПТ) насос работает в области номинальных параметров при согласовании режимов работы ДПТ и АБ. При установившемся режиме работы насоса ДПТ получает энергию от СБ, а пусковые режимы обеспечиваются энергией АБ. Составлена схема замещения данного варианта, исследованы переходные процессы пуска ДПТ при его питании от СБ и предложены варианты с запаздыванием подключения обмотки возбуждения двигателя.

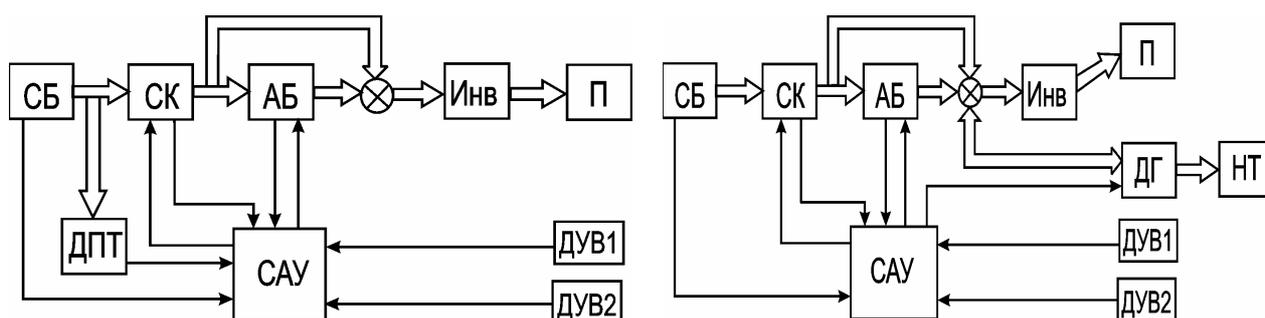
При прямом подключении ДПТ к СБ ( вариант №3), несмотря на более высокую эффективность всей системы, она оказывается неработоспособной из-

за сложных условий пуска двигателя. Для улучшения условий пуска может быть предложен вариант подключения обмотки возбуждения двигателя к АБ, что приближает условия пуска ко второму варианту, но и в этом случае пусковые режимы удлиняются в 2.5-5 раз, что не очень эффективно.



1. Вариант с асинхронным двигателем (АД)

2. Вариант с двигателем постоянного тока (ДПТ)



3. Вариант с прямым соединением ДПТ и СБ

4. Вариант с гидравлическим аккумулярованием (ГА) энергии

Рис.5 Варианты конфигураций СЭВС.

В варианте №4 с применением гидроаккумулялирования энергии насос работает в обратимых режимах и осуществляет не только подкачку воды, необходимую для потребления, но и создает запас воды, который при необходимости обеспечивает работу насоса в турбинном режиме.

Работа насоса в турбинном режиме позволяет уменьшить емкость АБ или полностью исключить ее использование. Конфигурация СЭВС с системой гидроаккумулялирования приведена на рис.6.

Анализ варианта №4, выполненный для различных значений энергопотребления, показал, что систему ГА рекомендуется использовать частично, при этом сглаживается характер нагрузки АБ, позволяя существенно уменьшить ее емкость и повысить КПД батареи при отдаче запасенной энергии.

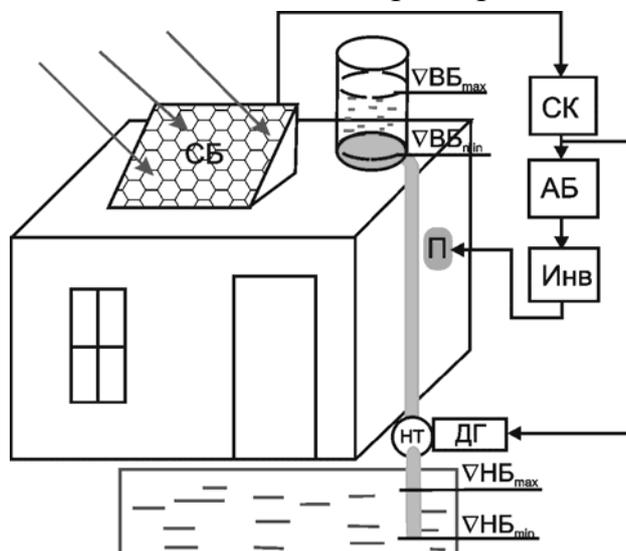


Рис.6 Система электро- и водоснабжения с гидроаккумулятором

**Пятая глава** посвящена разработке методики выбора оптимальной системы автономного индивидуального электроводоснабжения для условий центральной Мексики.

Рассмотрены особенности каждого из предложенных вариантов для определения оптимальных параметров системы и мощности СБ на основе критериальных уравнений пригодности и проведено технико-экономическое сравнение СЭВС.

Для варианта №1 критериальное выражение, обеспечивающее выработку энергии в соответствии с заданной нагрузкой имеет вид:

$$K_1 \cdot K_2 \cdot \tau_{СБ} \cdot P_{СБ} \geq (W_{1\text{потр}} + W_{\text{нас}}) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{ИНВ}} \cdot \eta_{\text{СК}}} + W_{2\text{потр}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{ИНВ}} \cdot \eta_{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{АБ}}} \quad (9)$$

где  $K_1$  - коэффициент снижения выработки СБ в утренние и вечерние часы;  $K_2$  - коэффициент снижения выработки СБ за счет затенения атмосферы промышленными выбросами и облачностью;  $W_{1\text{потр}}, W_{2\text{потр}}$  - потребление бытовыми приборами и системой освещения в дневные и ночные часы;  $W_{\text{нас}}$  - среднесуточная энергия, потребляемая системой водоснабжения;  $\eta_{\text{ИНВ}}, \eta_{\text{СК}}, \eta_{\text{АБ}}$  - КПД инвертора, СК и АБ соответственно.

Для определения оптимальных параметров СБ осуществлено распределение потоков энергии в зависимости от характера и времени

использования. Дневная нагрузка и энергия на водоснабжение проходят через инвертор и силовой контроллер, поэтому площадь СБ увеличивается на величину  $\eta_{инв} \cdot \eta_{ск}$ . Для энергоснабжения ночной нагрузки площадь СБ должна быть увеличена с учетом потерь в инверторе, силовом контроллере и АБ, т.е. на  $\eta_{инв} \cdot \eta_{ск} \cdot \eta_{АБ}$ .

Условием обеспечения пригодности варианта №2 является уравнение вида:

$$K_1 \cdot K_2 \cdot \tau_{СБ} \cdot P_{СБ} \geq W_{1потр} \cdot \frac{1}{\eta_{инв} \cdot \eta_{ск}} + W_{2потр} \cdot \frac{1}{\eta_{инв} \cdot \eta_{ск} \cdot \eta_{АБ}} + W_{нас} \cdot \frac{1}{\eta_{ск}} \quad (10)$$

В отличие от предыдущего варианта, поток энергии для нагрузки водоснабжения уже не проходит через инвертор, а лишь через силовой контроллер, что существенно уменьшает потери энергии в системе.

Варианту №3 соответствует следующее критериальное уравнение:

$$K_1 \cdot K_2 \cdot \tau_{СБ} \cdot P_{СБ} \geq W_{1потр} \cdot \frac{1}{\eta_{инв} \cdot \eta_{ск}} + W_{2потр} \cdot \frac{1}{\eta_{инв} \cdot \eta_{ск} \cdot \eta_{АБ}} + W_{нас} \quad (11)$$

Прямое подключение насоса к СБ исключает какие либо потери энергии в системе водоснабжения и это означает, что в данном случае мощность СБ минимальна по сравнению с другими вариантами.

Критериальное уравнение для варианта №4 выбирается из условия сохранения ночного энергопотребления  $W_2 = \text{const}$  независимо от типа системы аккумулирования и приведенное к стандартной форме имеет вид:

$$K_1 K_2 \tau_{СБ} P_{СБ} \geq \frac{W_1 [(1 - K_3) \eta_{нас} \eta_{турб} + K_3 \eta_{АБ}] + W_2 + W_{нас} [(1 - K_3) \eta_{нас} \eta_{турб} + K_3 \eta_{АБ}] \eta_{инв}}{\eta_{ск} [(1 - K_3) \eta_{нас} \eta_{турб} + K_3 \eta_{АБ}] \eta_{инв}} \quad (12)$$

Для анализа возможных вариантов режимов работы данной схемы введен коэффициент  $K_3$ , который представляет долю вечерней нагрузки  $W_2$ , идущую от АБ (рис.7).

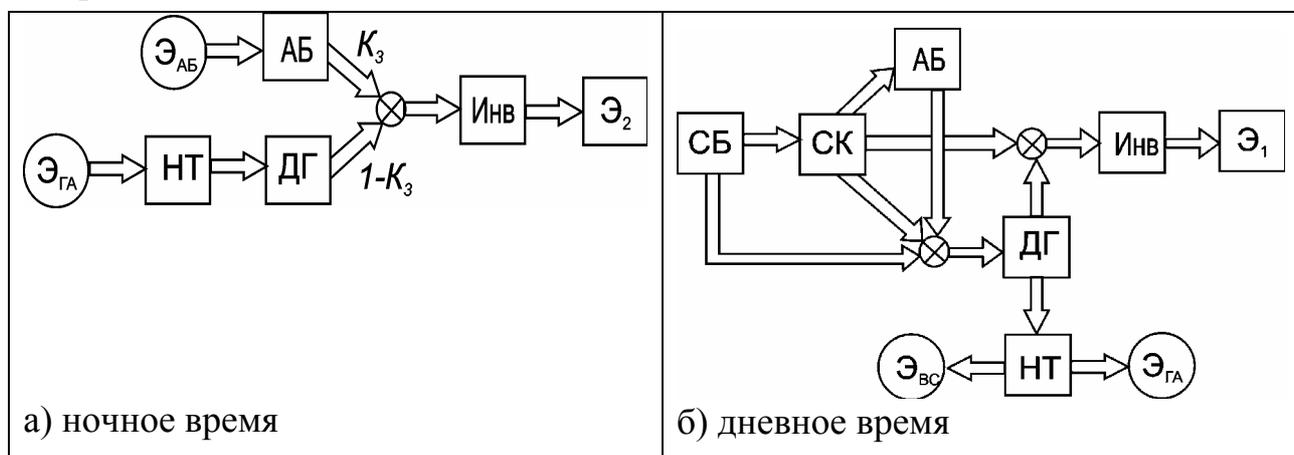


Рис.7 Энергетические потоки в СЭВС

При  $K_3=1$  (отсутствие ГА) уравнение (12) превращается в уравнение (10).

На основе критериальных соотношений (9-12) определены оптимальные параметры элементов системы для каждого варианта (табл 1). Оценив их стоимость, дополнительные затраты и общие расходы за 20 летний срок эксплуатации, можно перейти к технико-экономическому сравнению вариантов.

Проведенное технико-экономическое сопоставление (рис.8) показало, что наиболее эффективным является вариант №2.

Таблица 1

Сопоставление вариантов СЭВС

Вариант	Мощность СБ, Вт	Кол-во СБ, шт.	Площадь СБ, м <sup>2</sup>	Емкость АБ, А·ч	Мощность двигателя, Вт	Объем запас. воды, м <sup>3</sup>	Мощн. Инв., Вт	Стоимость, у.е.
1	1152	32	10,4	100	620	5	800	9025,5
2	1008	28	9,1	100	620	5	600	7606,3
3	1008	28	9,1	100	620	5	600	7606,3
4	$K_3=0$	38	12,35	0	620	40	600	15220
	$K_3=0.25$	36	11,7	30	620	35	600	14004
	$K_3=0.5$	32	10,4	45	620	25	600	11574
	$K_3=0.75$	30	9,75	60	620	15	600	9683
	$K_3=1$	1008	28	9,1	100	620	5	600

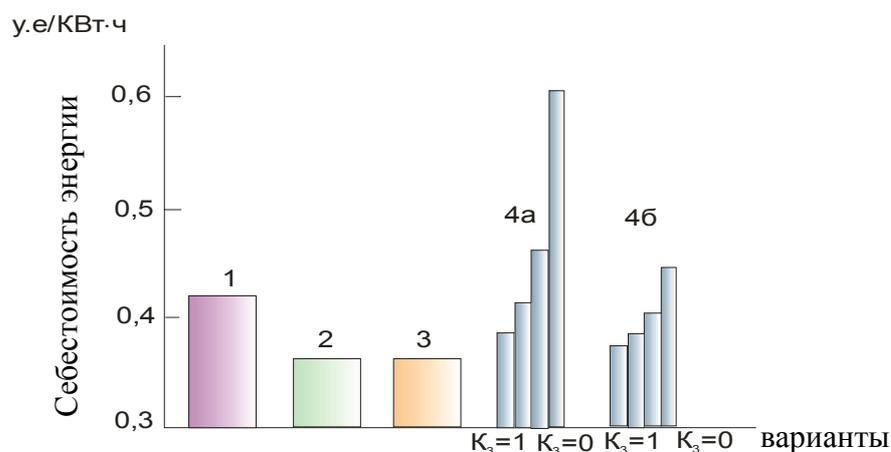


Рис.8 Технико-экономическое сравнение вариантов СЭВС

(4а - без дополнительных бассейнов; 4б - с дополнительными бассейнами)

## Заключение

Основные результаты выполненной диссертационной работы кратко можно сформулировать следующим образом:

1. На основе анализа состояния развития НВИЭ в Мексике показана эффективность их использования для децентрализованного энергоснабжения потребителей малой мощности. Установлено, что приоритетное значение имеет использование солнечной энергии и преобразование ее в электрическую в единой автономной системе энерго- и водоснабжения.
2. Определены валовые ресурсы солнечной энергии в помесечных интервалах для характерных регионов Мексики и выявлено, что среднемесячный приход колеблется в течение года в диапазоне 14-26 МДж/м<sup>2</sup>.
3. Разработана уточненная математическая модель прихода солнечной энергии на наклонную площадку, предложены методики расчета часового, дневного и среднемесячного прихода солнечной радиации для условий Мексики в случаях наличия и отсутствия фактических данных и учета влияния высоты местности.
4. Предложена методика определения ориентации приемной площадки СБ, обеспечивающий выравнивание графика выработки солнечной энергии и согласование его с нагрузкой, характерной для условий Мексики.
5. Разработана методика определения максимальной выходной мощности СБ при переменном значении интенсивности солнечного излучения. Предложены принципы управления СБ, позволяющие обеспечить оптимальный отбор мощности в зависимости от состояния АБ.
6. Обоснован выбор типа системы аккумулирования, дано математическое описание АБ как элемента системы регулирования и разработана модель определения текущих параметров и диагностирования ее состояния.
7. В результате исследования энергетических характеристик и взаимосвязи элементов СЭВС предложены четыре характерных варианта ее структуры. Рассмотрены технические особенности вариантов и выбраны их параметры, обеспечивающие удовлетворение графика нагрузки. Для СЭВС с использованием принципов гидроаккумулирования разработана методика определения параметров работы насосов в обратимом турбинном режиме.
8. Разработан алгоритм системы управления СЭВС, объединяющий модели прихода солнечной энергии, диагностики состояния АБ, отбора

максимальной мощности от СБ и контроль насосной установки, обеспечивающий оптимальный режим эксплуатации.

9. Проведено технико-экономическое сопоставление вариантов по себестоимости вырабатываемой энергии и выбран лучший.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Анализ современного состояния и перспектив использования возобновляемых источников энергии в Мексике./ Елистратов В.В., Кортес Л.//Сборник докладов Междунар.конф. «Возобновляемая энергетика-2003» С-Петербург, СПбГПУ, с.211-217.
2. Энергоснабжение автономных потребителей малой мощности на основе солнечной энергии в условиях Мексики./ Елистратов В.В., Кортес Л.//Материалы Междунар. конф. «Экобалтика 2004» С-Петербург, СПбГПУ, с.57-58.