

На правах рукописи

ИБРАХИМ ТОГОЛА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАЙОНОВ
ЗАПАДНОЙ АФРИКИ**

Специальность 05.14.08

“Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург
2003**

Работа выполнена на кафедре возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Елистратов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Виссарионов Владимир Иванович

– кандидат технических наук, доцент
Беляев Андрей Николаевич

Ведущая организация: Физико-технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита диссертации состоится "16" декабря 2003 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "13" ноября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

В.Т. Орлов

Актуальность темы. В странах Западной Африки имеется большая потребность в водоподъёмных установках для обеспечения водой сельскохозяйственных районов с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Из всех устройств для преобразования энергии возобновляемых источников солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ) являются самыми распространёнными в странах западной Африки, особенно для энергопитания систем водоснабжения.

В настоящее время технологии применения солнечных фотоэлектрических установок достаточно развиты и надёжны, причем стоимость солнечных фотоэлектрических установок продолжает снижаться, а КПД увеличиваться. Если в 80-х годах 1 Ватт пиковой мощности стоил около 20\$ США при КПД меньше 10% , то сегодня 1 Ватт пиковой мощности стоит около 3\$ США с КПД больше 14%. Необходимо отметить, что гарантийный срок современных солнечных фотоэлектрических установок составляет более 20 лет. В мире продолжают исследования, разрабатываются новые солнечные фотоэлектрические установки со следящими системами и конструкции с концентраторами и солнечными элементами с высоким КПД (около 30%). Различные солнечные фотоэлектрические установки выпускаются и предлагаются на рынке. Поэтому очевидна перспектива развития водоснабжения на основе использования солнечной энергии для сельскохозяйственной местности западно-африканских стран.

В большинстве стран Западной Африки до сих пор используются одноступенчатые дорогостоящие конструкции солнечных фотоэлектрических установок для водоподъёмных систем. Выбор лучших, наиболее экономичных схем и конструктивных решений, учитывающих условия эксплуатации, природно-климатические и социально-экономические особенности стран Западной Африки, является весьма актуальными при внедрении систем водоснабжения на основе солнечных фотоэлектрических установок в сельскохозяйственной местности, что и определило цель и задачи данной

диссертационной работы.

Цель диссертации состояла в разработке методики выбора схем и параметров солнечных фотоэлектрических водоподъемных систем для сельскохозяйственных районов Западной Африки.

Основные задачи исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определить графики водопотребления и потребления электроэнергии для конкретных местностей в Западной Африке;
- выполнить анализ современного состояния и опыта использования солнечных фотоэлектрических установок в западно-африканских странах для водоснабжения сельскохозяйственных районов;
- произвести расчет поступления солнечного излучения на различные поверхности: неподвижную и следящие по одной и двум осям, и обосновать выбор лучшей системы слежения;
- выбрать схему систем водоснабжения с учетом условий её применения;
- провести анализ энергетических характеристик и выявить основные взаимосвязи элементов солнечных водоподъемных установок;
- разработать методику и провести сравнительную оценку солнечных фотоэлектрических установок различных конструкций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Определены районы, в которых целесообразно применять системы солнечного водоподъема, на основе классификации источников и потенциала подземных вод в республике Мали.

2. Обоснована целесообразность использования СФЭУ с одноосной системой слежения по результатам расчёта поступления солнечной энергии на произвольно ориентированные поверхности применительно к условиям Мали и другим странам Западной Африки.

3. Выбрана наиболее рациональная схема системы водоснабжения на базе СФЭУ.

4. Сформированы принципы и осуществлен выбор элементов системы водоснабжения на основе проведенного анализа имеющихся систем солнечного водоподъёма.

5. Разработана и реализована новая методика расчёта и выбора лучших вариантов СФЭУ для водоснабжения сельскохозяйственных районов в Западной Африке.

Практическая ценность

Разработанные методы и результаты исследований по выбору лучших вариантов схемы систем водоснабжения и конструкций СФЭУ могут быть использованы для решения задач проектирования солнечных фотоэлектрических водоподъёмных установок в соответствии с социально-экономическим состоянием сельскохозяйственных районов в Западной Африке.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа возможных путей решения проблемы водоснабжения сельскохозяйственных районов западной Африки.
2. Классификация территории Мали с точки зрения глубины залегания подземных вод и общего потенциала водных ресурсов, обоснование выбора целесообразных мест размещения водоподъёмных установок на основе СФЭУ.
3. Результаты анализа современного состояния использования солнечных фотоэлектрических энергоустановок на основе опыта западно-африканских стран по применению таких установок для водоподъёма.
4. Обоснование целесообразности выбора СФЭУ с одноосной системой слежения по результатам анализа поступления солнечной энергии на произвольно ориентированные поверхности.
5. Методика выбора структурной схемы системы водоснабжения для фермерских хозяйств Западной Африки.

6. Принципы выбора элементов солнечных систем водоснабжения с учетом взаимосвязей между ними при использовании солнечного излучения в качестве первичного источника энергии.
6. Методика выбора лучших вариантов солнечных фотоэлектрических установок для систем водоснабжения в соответствии с социально-экономическим состоянием сельскохозяйственных районов в Западной Африке.

Апробация работы. Результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на различных европейских и африканских семинарах, конференциях, симпозиумах, а также отраслевых семинарах и конференциях: Renewable Energy Vehicle for Local Development, Folkecenter Denmark 2000, Forum for World Council for Renewable Energy Berlin 2002, North South Initiative on Renewable Energy Cologne 2002, Renewable energy and Global Market Denmark 2003, Forum des Energies Renouvelables au Mali 2003, Semaine de l’Energie du Mali 2003, Energie et Pauvrete Banque Mondiale Dakar Senegal 2003, Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership Ghana 2003.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 144 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 18 таблиц и список цитируемой литературы из 46 наименований.

ОСНОВНОЕ 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.

В первой главе приведен анализ проблемы водоснабжения сельскохозяйственных районов стран Западной Африки и предложены некоторые пути её решения. Для этого страны Западной Африки были разделены на «сухие» страны (Мали, Буркина Фасо, Нигер, Мавритания, Сенегал) и страны на побережье Атлантического океана (Нигерия, Бенин, Того, Гана, Кот Дивуар, Либерия и другие) где проблема водоснабжения стоит не так остро. Рассмотрены и проанализированы климатические условия «сухих» стран, обусловленные тропическим, континентальным и частично субэкваториальным климатом (минимальная температура $+17^{\circ}\text{C}$ и максимальная температура $+45^{\circ}\text{C}$) и определены потребности в воде для их сельскохозяйственных районов и возможные пути удовлетворения этих потребностей.

Классифицирована территория Мали с точки зрения глубины залегания подземных вод и общего потенциала водных ресурсов (рис.1). Анализ показал, что в северных и центральных частях Мали подземные воды залегают на глубине от 10 до 50 метров, что позволяет широко использовать их для целей водоснабжения. В то же время более 45% населения этих местностей не имеют современного водоснабжения.

Выполнен анализ перспектив использования традиционных источников энергии для питания водоподъёмных установок, который показал неперспективность и нерентабельность применения таких источников.

Рассмотрена и проанализирована возможность применения возобновляемых источников энергии различных видов для энергопитания

водоподъемных установок, а также выявлен потенциал этих видов энергии в странах Западной Африки: энергии биомассы, ветровой энергии, солнечной энергии.

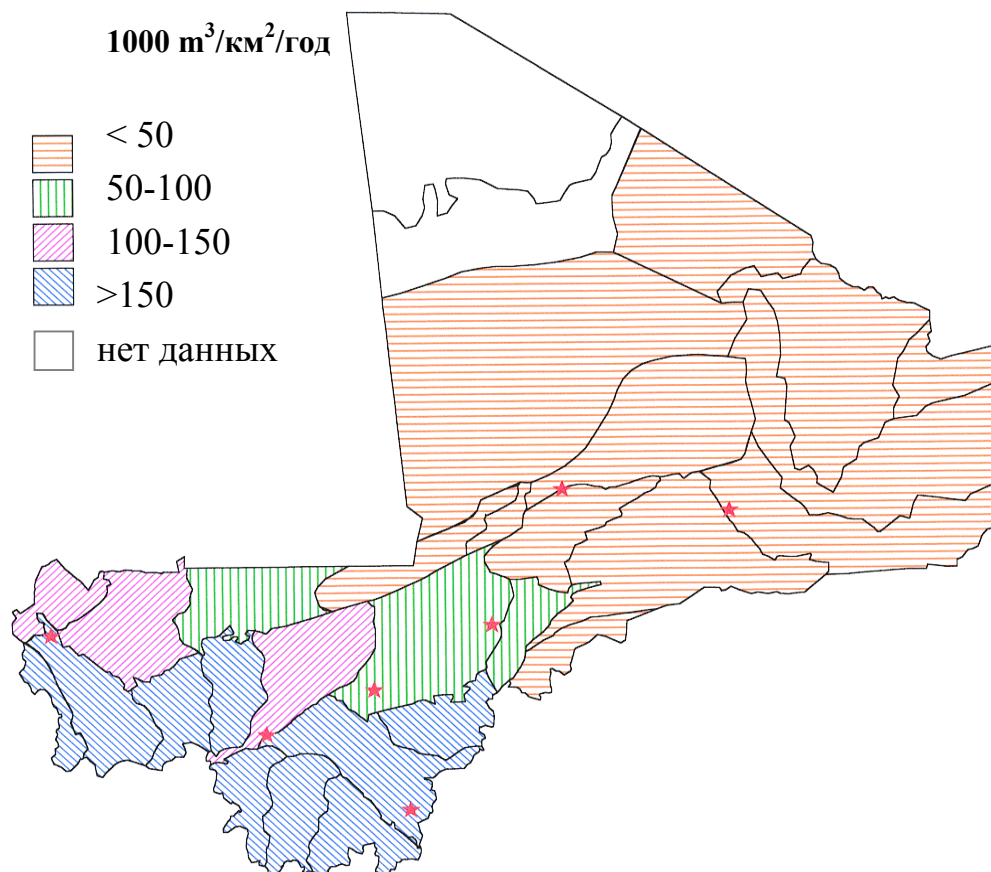


Рис.1. Потенциальные запасы воды (поверхностные и подземные воды)

Показано, что использование солнечной энергии для энергопитания водоподъемных установок является наиболее перспективным по сравнению с другими видами возобновляемой энергии. В среднем, Западная Африка получает солнечной энергии около 5-8 кВт·ч/м²/день. На рис. 2. представлены реальные поступления солнечного излучения на горизонтальную поверхность в течение года на территории Мали.

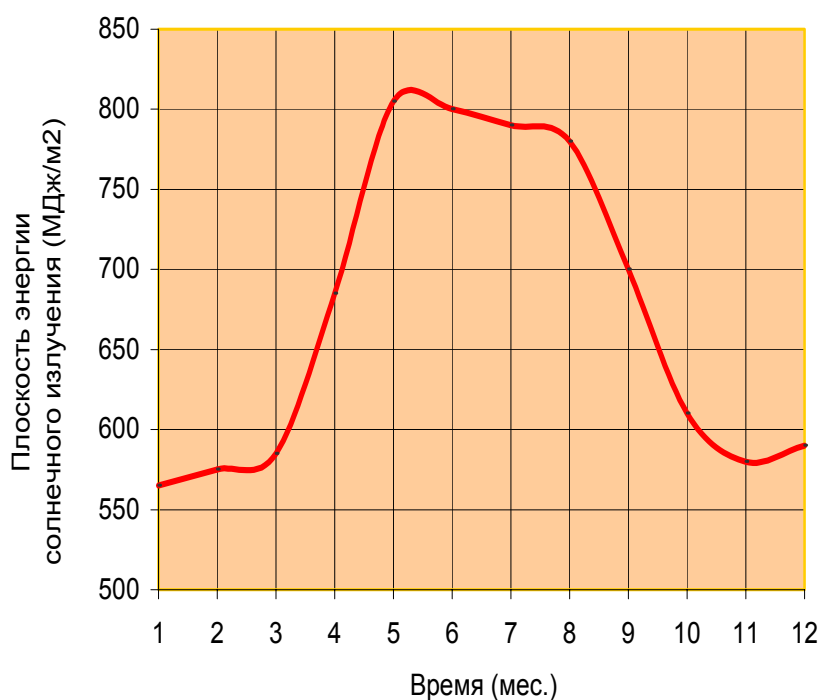


Рис. 2. Реальное поступление солнечного излучения на горизонтальную поверхность в течение года на территории Мали

В
о
втор
ой

главе рассмотрено современное состояние и развитие солнечных фотоэлектрических установок.

Рассмотрены фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии на основе кремния, арсенида галлия, теллурида кадмия, аморфного кремния и др. и динамика изменения их стоимости. Если в США в начале 1960-х годов 1 Вт пиковой мощности солнечной батареей на основе кремния (Si) стоил 400\$ США, то в 1972 г. стоимость его снизилась до 50\$ США/Вт, в 1975г - до 20\$ США/Вт, а в 2002 году составила около 3\$ США/Вт для конструкции без концентраторов. Разработанные в Физико-техническом Институте им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт Петербург) фотопреобразователи на основе гетероструктур арсенида галлия-арсенида алюминия со сферическими и линзовыми концентраторами позволили создать солнечные модули с КПД

более 20%, из которых можно скомпоновать достаточно мощные СФЭУ. Учитывая, тенденцию снижения стоимости фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии, строительство небольших модульных солнечных электростанций становится экономически целесообразным.

Проанализирован опыт применения солнечных фотоэлектрических энергоустановок для водоснабжения в сельских районах в ряде стран Западной Африки: Мали, Гана, Буркина Фасо, Сенегал и по нескольким региональным програм.

В настоящее время в странах Западной Африки эксплуатируется более 1800 солнечных водоподъёмных установок общей мощностью более 2,3 МВт. Из 500 установок СФЭУ для водоподъёма в Мали с общей мощностью около 1000 КВт менее 5% имеют центробежные насосы; остальные 95% используют погружные насосы с минимальной мощностью 850 Вт и максимальной мощностью 12960 Вт. При этом наиболее распространенная мощность СФЭУ составляет 1000-1600 Вт, которая обеспечивает потребности в воде для небольших сельскохозяйственных потребителей (рис.3). Из-за отсутствия международного тендера по выбору наилучшей конструктивной схемы и оборудования СФЭУ данные проекты оказались очень дорогими.

Таким образом, несмотря на многолетний опыт западноафриканских стран по внедрению солнечных водоподъёмных установок; отсутствие методики выбора лучших систем для этих стран приводило к неоправданному перерасходу средств.

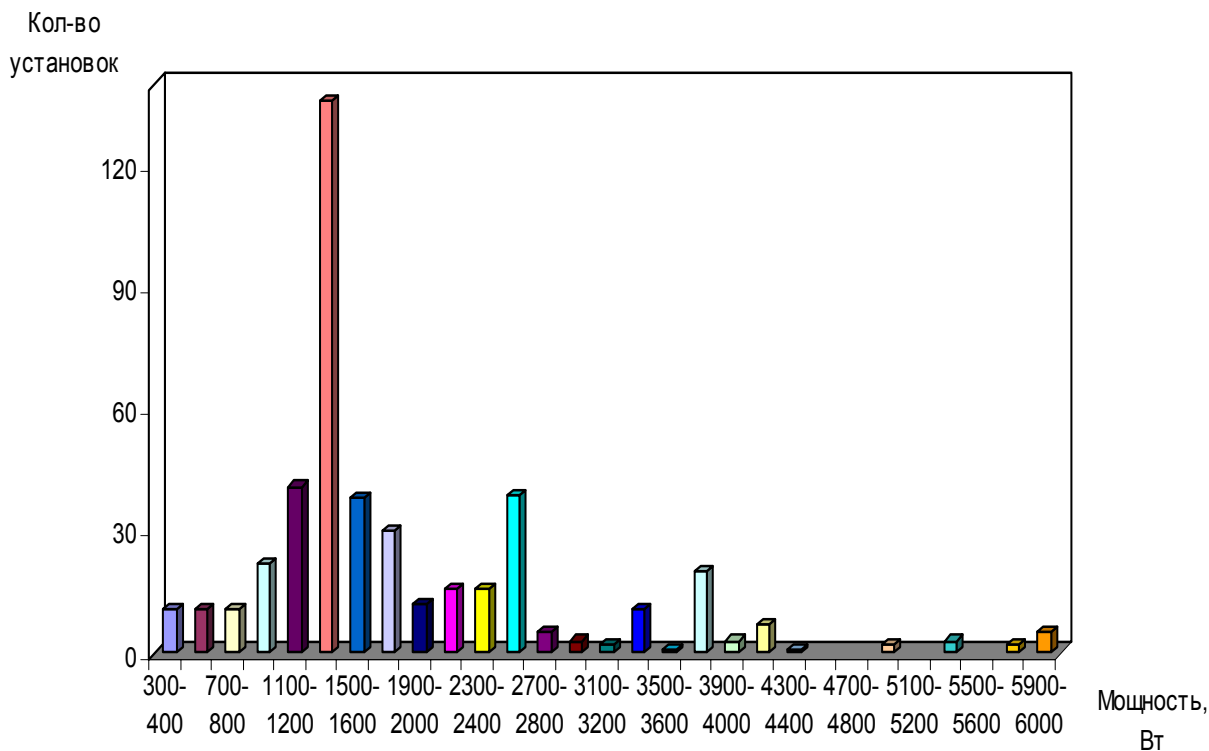


Рис. 3. Распределение солнечных водоподъемных установок по мощности

В третьей главе обоснована целесообразность использования СФЭУ с одноосной системой слежения по результатам расчёта поступления солнечной энергии на произвольно ориентированные поверхности, применительно к условиям Мали: $\varphi = 15^\circ$ с.ш., долгота $\lambda = 9^\circ$ з.д. и средний меридиан для местного часового пояса $\lambda_{\text{ср}} = 0^\circ$.

В качестве исходной информации использованы данные месячной суммарной солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную поверхность $Q_{\text{мес.гор.реал}}^\Sigma = f(t)$, полученные в метеоцентре Мали.

Разработана структура водопотребления для фермерского хозяйства и рассчитано суточное водопотребление $V_{\text{сут}}^\Sigma$.

$$V_{\text{сут}}^\Sigma = V_{\text{пол}} + V_{\text{скот}} + V_{\text{ком}} \quad , \quad (1)$$

где $V_{\text{пол}}$ - объем воды, необходимый для полива земель,

$V_{\text{скот}}$ - объем воды используемый для животноводства,

$V_{ком}$ - объем воды на коммунальные бытовые нужды.

Для выбора лучшей системы проработаны и проанализированы различные схемы систем водоснабжения, отличающиеся составом оборудования и наличием или отсутствием бака аккумулятора. В результате выполненного анализа выбрана структурная схема системы водоснабжения, в наибольшей степени удовлетворяющая потребностям фермерского хозяйства, которая представлена на рис. 4.

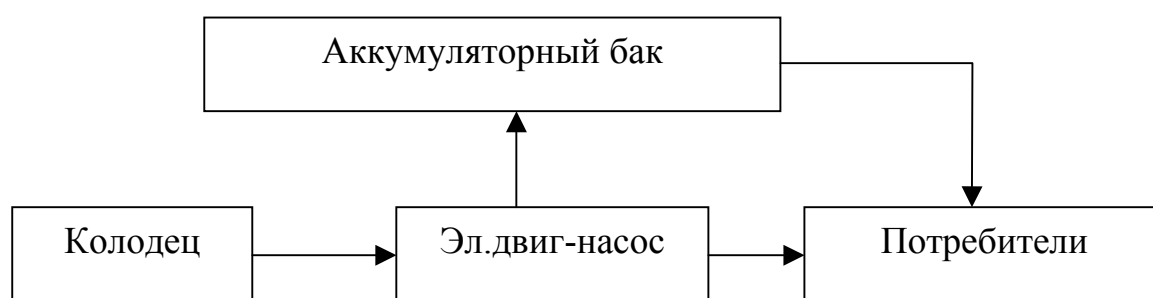


Рис. 4. Структурная схема системы водоснабжения

Обоснован выбор элементов системы “солнечная фотоэлектрическая установка – электродвигатель – насос”.

В этом случае мощность солнечной батареи (СБ), $P_{СБ}$ определяется из уравнения баланса энергии:

$$P_{СБ} \cdot \tau = \frac{P_{эд} \cdot \tau_{сут}}{\eta_i}, \quad (2)$$

где, $P_{эд} = \frac{V \cdot \rho \cdot H \cdot g}{\tau_{сут} \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_n}$, τ – продолжительность солнечного сияния в течение

месяца; $P_{эд}$ – потребляемая мощность асинхронного электродвигателя; $\tau_{сут}$ – время работы установки; η_i – КПД инвертора; V – объем воды, H -напор; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; $\eta_{эд}$, η_n – КПД электродвигателя и насоса.

Таким образом, без учета расхода энергии на собственные нужды мощность СБ равна:

$$P_{CB} = \frac{V \cdot \rho \cdot H \cdot g}{\tau \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_n \cdot \eta_i} \quad (3)$$

СФЭУ относятся к источникам питания постоянного тока, поэтому при применении электродвигателя переменного тока (асинхронный двигатель) для вращения насосов его подключают через инвертор. В выбранной схеме применен инвертор с тиристорным микропроцессором преобразователя частоты (ТПЧ) для регулирования частоты вращения насосов. При использовании ТПЧ повышается эффективность водоподъемной установки и возможен выбор режима её работы в зависимости от интенсивности солнечной радиации. Это позволяет следить за изменением прихода солнечного излучения и держать напряжение на электродвигателе почти постоянным. Схема соединения представлена на рис. 5.

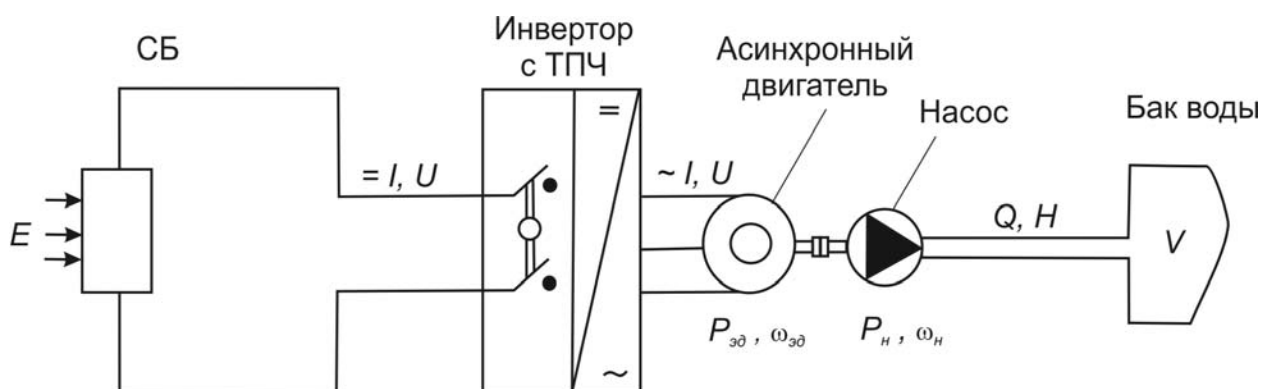


Рис. 5. Принципиальная схема соединений элементов СФЭУ и система водоподъёма

Четвертая глава посвящена исследованию энергетических характеристик солнечных насосных установок и взаимосвязи их элементов.

Рассматриваются математические модели всех элементов и влияние изменения прихода солнечной радиации на их параметры.

проанализированы два варианта компоновки оборудования солнечных установок.

1. Водоподъёмная установка с электрической аккумуляторной батареей при питании двигателя постоянного тока (ДПТ) насоса только от аккумуляторной батареи.

2. Водоподъёмная установка с регулированием частоты вращения приводного асинхронного двигателя без аккумуляторной батареи.

Показано, что использование аккумуляторных батарей (АБ) в качестве накопителя энергии позволяет улучшить энергетические и переходные характеристики системы «солнечная фотоэлектрическая установка–двигатель–насос», так как при этом не требуется согласования режима и характеристики двигатель – насос (нагрузка) с вольтамперной характеристикой (ВАХ) солнечных фотоэлектрических установок. Однако, анализ опыта работы аналогичных установок в этой области показывает, что использование АБ в качестве накопителя энергии для дальнейшего питания ДПТ имеет ряд недостатков: дороговизну и громоздкость АБ; необходимость постоянного технического обслуживания, частую их замену; потери энергии в процессе накопления. Для условий западноафриканских сельскохозяйственных районов целесообразно для водоподъёмных систем обходиться без аккумуляторных батарей и использовать второй вариант.

При прямом подключении двигателя-насоса к СФЭУ через инвертор для эффективной работы установки в течение всего рабочего времени необходимо соблюдать следующее критериальное условие:

$$P_{CB} = P_H / \eta_C, \quad (4)$$

где P_H – полезная мощность насоса; η_C – КПД системы.

Для всех уровней солнечной радиации потребляемая мощность насоса должна быть близка к величине оптимальной пиковой мощности СБ, которая является функцией от радиации $P_{CB} = f(E)$ и определяется ВАХ солнечной батареи $I_{CB} = f(U_{CB})$.

В пятой главе описана методика расчета и выбора лучшей вариантов

солнечных фотоэлектрических установок для водоснабжения в соответствии с социально-экономическим состоянием сельскохозяйственных районов Западной Африки.

Проведен анализ сравниваемых вариантов конструктивных схем конкурирующих солнечных батарей. Конструктивные схемы солнечных электроустановок разделены на две основные группы: без концентратора и с концентраторами лучистой энергии.

Разработана методика расчёта площади различных конструкций солнечной батареи S_{CB} обеспечивающих необходимую потребность для фермерского хозяйства в любое время года.

1. Мощность, потребляемая насосом:

$$P_n = \frac{Q \cdot \rho \cdot H \cdot g}{\eta_n} \quad (5)$$

2. Мощность, потребляемая электродвигателем, равна:

$$P_{эд} = \frac{P_n}{\eta_{эд}} \quad , \quad (6)$$

3. Площадь СБ определяется выражением:

$$S_{CB} = \frac{P_{CB}}{E_{cp} \cdot \eta_{cэ}} \quad , \quad (7)$$

где $\eta_{cэ}$ – коэффициент полезного действия солнечного элемента; при определении E_{cp} учитываем только время солнечного сияния.

Определены стоимости солнечных батарей различных конструкций:

1. Плоской СБ:

$$C_{CBn} = \bar{C}_{cэn} \cdot S_{CBn} \quad , \quad (8)$$

где $\bar{C}_{cэn}$ – стоимость единицы площади солнечных элементов, используемых в плоской СБ; S_{CBn} – площадь плоской СБ.

2. СБ с концентратором:

$$C_{СБк} = \bar{C}_{ск} \cdot S_{СБк} + \bar{C}_{сэк} \cdot \frac{S_{СБк}}{K} = S_{СБк} \cdot \left(\bar{C}_{ск} + \frac{\bar{C}_{сэк}}{K} \right) \quad (9)$$

где $\bar{C}_{ск}$ и $\bar{C}_{сэк}$ – стоимость единицы площади концентратора и солнечных элементов (СЭ), используемых в СБ с концентратором; K – коэффициент концентрации; $S_{СБк}$ – площадь солнечной батареи с концентратором.

3. Из приведенных соотношений получаем:

$$\frac{C_{СБн}}{C_{СБк}} = \frac{\bar{C}_{сэп}}{\bar{C}_{сэк}} \cdot \left(\frac{\bar{C}_{к}}{\bar{C}_{сэк}} + \frac{1}{K} \right) \cdot \frac{S_{СБкп}}{S_{СБн}}, \quad (10)$$

Используя последнее выражение, строим зависимость

$$\frac{C_{СБн}}{C_{СБк}} = f(K)$$

при заданных соотношениях $\bar{C}_{сэп} / \bar{C}_{сэк}$ и $\bar{C}_{к} / \bar{C}_{сэк}$.

Обеими соотношениями можно варьировать т.е. $\bar{C}_{сэп} / \bar{C}_{сэк} - \text{var.}$ и $\bar{C}_{к} / \bar{C}_{сэк} - \text{var.}$

Из результатов расчётов представленных в табл.1 и на рис. 6, следует что даже в случае, когда стоимость СЭ из арсенида галлия (GaAs) в 10 раз превышает стоимость СЭ из кремния (Si), полная стоимость СБ с концентраторами будет в 8 –20 раз меньше, чем стоимость плоской СБ при одноосном слежении с концентратором ($K = 200$).

Таким образом доказана целесообразность использования СФЭУ с концентраторами в виде линз Френеля и СЭ из GaAs, имеющей одноосное слежение в водоподъемных установках для фермерских хозяйств. Такая установка должна иметь площадь не менее 20 м².

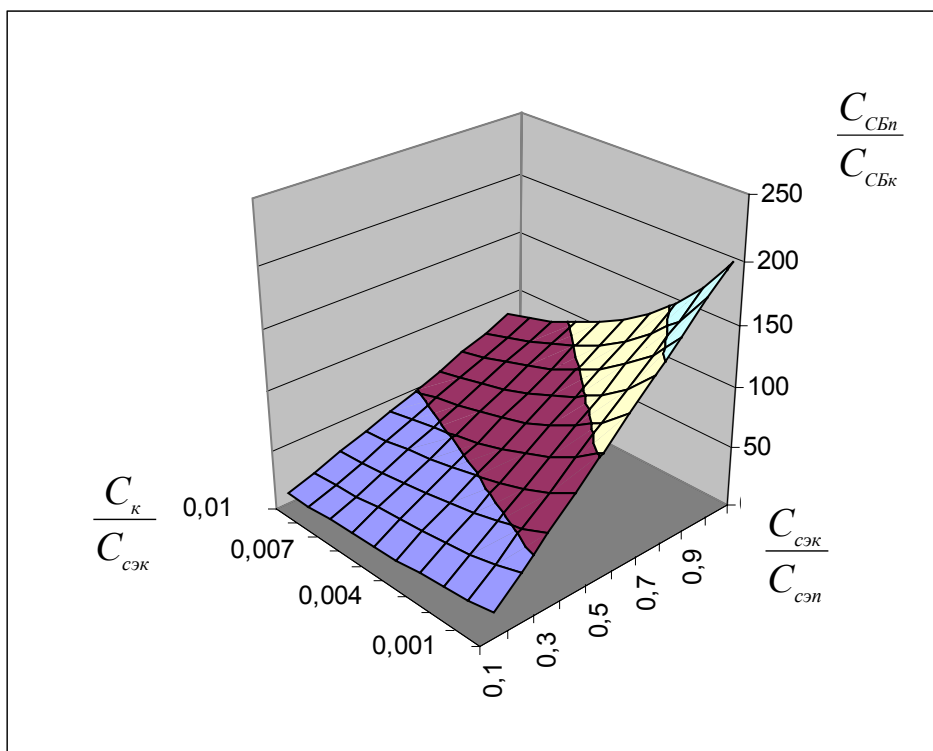


Рис. 6. Соотношение стоимости плоских СБ и СБ с концентратором в СФЭУ при $K = 200$

В заключении представлены следующие выводы по результатам диссертационной работы:

1. Показано, что проблема водоснабжения в сельскохозяйственных районах Мали и других стран Западной Африки может быть успешно решена при использовании солнечных водоподъёмных установок. Определены объёмы воды, требуемые для полива земель, водопоя скота и удовлетворения бытовых нужд в выбранном сельскохозяйственном районе Мали в течение года, и соответствующие мощности солнечных фотоэлектрических установок.

2. На основании сравнительного анализа различных схем выбрана система водоснабжения, обеспечивающая типичное водопотребление на ферме и позволяющая уменьшить стоимость установки, в том числе затраты на аккумуляторный бак.

3. Показано, что слежение за Солнцем позволяет существенно (~ на 30%) увеличить поступление солнечного излучения на поверхность и обоснована целесообразность использования СФЭУ с одноосной системой слежения в условиях Мали

4. Выбрана структурная схема солнечной водоподъемной установки без АБ, в которой применяется инвертор с микропроцессором. Преимущества использования такого инвертора, заключается в том, что он позволяет поддерживать постоянным значение напряжения на входе электродвигателя, а следовательно, стабилизирует частоту вращения электродвигателя и насоса при изменении интенсивности солнечного излучения, что увеличивает КПД электродвигателя и насоса.

5. Разработана методика и произведен расчет площади и стоимости СФЭУ различных типов, в результате которого установлено, что:

- несмотря на существенное изменение в течение года среднего объема водопотребления (V , m^3), площадь солнечных батарей различных типов изменяется не существенно. Это объясняется тем, что изменение водопотребления соответствует изменению прихода солнечной энергии;
- площадь неориентируемых СФЭУ значительно (~ на 27%) превышает площадь СФЭУ, имеющих системы слежения, а следовательно, применение последних во многих случаях может оказаться более целесообразным, если стоимость и надежность систем слежения будут приемлемыми;
- в рассматриваемых водоподъемных установках целесообразно использовать СФЭУ с концентраторами в виде линз Френеля и СЭ из GaAs, имеющие систему слежения за солнцем. Выбранная СФЭУ с концентраторами должна иметь мощность ~ 2,5 кВт и площадь не менее 20 m^2 , чтобы обеспечить мощность, требуемую для гарантированного водоснабжения фермы в течение всего года; экономический расчет показывает, что полная стоимость установки составляет 39334 \$ США против 77000 \$ США аналогичной установки, уже построенной в Мали.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы:

1. Togola I., Burrell T. PV Experiences in Africa, UNEP Collaborating Center on Energy and Environment, Risoe, Denmark, 2001, с.43-44
2. Togola I., The place of Renewable Energy in the Sustainable Development Policy of West AFRICAN Countries, International Renewable Energy Agency (IRENA): Eurosolar- Berlin 2001, с.52-53
3. Togola I., Burrell T., Sokona Y., A New Sustainable Energy Path for African Development: Think Bigger Act Faster, EDRC/ENDA, Energy and Development Research Centre, University of Cape Town South Africa, Environmental Development Action, Senegal, 2002, C.52-54
4. Prof. Elistratov V.V, Togola I., Burrell T., Renewable Energy in West Africa, Forum for World Council for Renewable Energy Berlin 2002, с. 151-153
5. Togola I., Sarr S., Secteur Prive et les Energies Renouvelable en Afrique de l'Ouest, Cas de AREED (African Rural Energy Enterprises Development), Energie et Pauvreté, Banque Mondiale, Dakar Sénégal 2003
6. Togola I., Le Mali-Folkecenter pour les Energies Renouvelable, expériences au Mali, Forum des Energies Renouvelable au Mali 2003