На правах рукописи

ТИХОНОВ ПАВЕЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО МОДУЛЯ

05.14.08 – энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Государственном научном учреждении Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Федерального агентства научных организаций (ГНУ ВИЭСХ ФАНО)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Харченко Валерий Владимирович

Официальные оппоненты: **Тягунов Михаил Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»

Бутузов Виталий Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», географический факультет, лаборатория возобновляемых источников энергии

Защита состоится «16» сентября 2014 г. в 12:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 006.037.01 в Государственном научном учреждении Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, г. Москва, 1-ый Вешняковский проезд, д.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ВИЭСХ.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Некрасов Алексей Иосифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

При нынешнем развитии техники человеку трудно даже представить, как можно обходиться без привычных для него благ цивилизации. Современные достижения обеспечивают высокий уровень жизни и комфорта для человека, проживающего в странах с развитой и развивающейся экономикой. Чтобы поддерживать этот уровень необходимо большое количество энергии. В соответствии с нормативами потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства, разработанными Институтом экономики ЖКХ совместно с Управлением социально-экономического развития Министерства экономики Российской Федерации, минимальная норма горячей воды, расходуемой на санитарно-гигиенические и хозяйственные нужды, на одного человека составляет 105 л в сутки (при температуре горячей воды +55 °С), а потребление электрической энергии в среднем на одного человека в сутки составляет около 1,4 кВт·ч. Большая часть затрачиваемой на эти нужды энергии производится, в основном, на генерирующих станциях, работающих на органическом ископаемом топливе.

Ресурсы ископаемых видов топлива расходуются высокими темпами. Уже в этом столетии их дефицит может существенно сказаться на жизни людей, в связи с чем в качестве альтернативы особое внимание уже сейчас уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Основными преимуществами возобновляемых источников являются неисчерпаемость и экологическая чистота эксплуатации большинства установок на их основе. Именно эти свойства определяют перспективность данного направления.

Актуальность работы. В настоящее время работы по вовлечению в хозяйственный оборот ВИЭ в Российской Федерации получают все большее развитие, что соответствует общемировой тенденции. Особое значение имеет развитие технологий прямого преобразования солнечного излучения (СИ) в электрический ток, реализуемых в фотоэлектрических модулях (ФЭМ). Мировая практика показывает, что именно этот сектор ВИЭ развивается наиболее высокими темпами.

В ФЭМ для выработки электроэнергии используется только часть приходящей солнечной радиации (КПД широко распространённых ФЭМ из кристаллических кремниевых СЭ оценивается в 14-19 %), остальная – рассеивается в виде теплоты в окружающее пространство. Проблема более полного использования энергии приходящего СИ решается путём интеграции фотоэлектрических (ФЭ) панелей и солнечных коллекторов (СК) в одно технологическое устройство – создания нового типа установок, так называемых фотоэлектрических тепловых модулей (англ., «photovoltaic thermal modules»). В таких модулях солнечная энергия за счёт полупроводниковых фотопреобразователей преобразуется в электричество, а за счёт теплового абсорбера – в тепло. Более полное использование энергии приходящего СИ в фотоэлектрических тепловых модулях (ФЭТМ) и меньшее количество конструктивных элементов позволяют также снизить себестоимость вырабатываемой энергии в сравнении с комбинированной установкой из ФЭМ и СК.

Эффективная работа фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в процессе эксплуатации – одна из актуальнейших задач. Во время работы ФЭП под воздействием СИ их температура достигает высоких значений, из-за чего существенно снижается эффективность выработки электрической энергии. Специально подобранные режимы и схемы работы ФЭТМ позволяют повысить вырабатываемую им фотоэлектрическую энергию за счёт отвода теплоносителем от них тепловой энергии.

Более того, в связи с огромным потенциалом, которым обладает солнечная энергия, учитывая оптимистичные прогнозы развития и наблюдаемые темпы снижения стоимости ФЭП, важно сегодня развивать исследования в области солнечной энергетики, чтобы в будущем не возникало зависимости от импортных установок, как это наблюдается в некоторых отраслях нашей промышленности.

Цель работы. Обоснование параметров и определение режимов работы когенерационного ФЭТМ для обеспечения эффективного энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Оценить распределение энергии приходящей солнечной радиации в фотоэлектрической панели ФЭТМ.

2. Обосновать и разработать технологическую схему солнечной когенерационной установки с улучшенными техническими характеристиками в сравнении с установками с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя.

3. Обосновать оптимальные параметры и определить режимы работы ФЭТМ в соответствии с особенностями рабочей схемы когенерационной установки, а также при использовании совместно с тепловым насосом (ТН).

4. Создать математическую модель, описывающую работу ФЭТМ при функционировании в составе разработанной технологической схемы.

5. Разработать и изготовить макет ФЭТМ и комплекс лабораторного оборудования для экспериментальных исследований работы модуля с одновременным мониторингом метеопараметров.

6. Провести технико-экономическую оценку различных вариантов использования солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись аналитические и экспериментальные методы исследования. Использовались методы математического моделирования с применением программного обеспечения ANSYS, MATLAB и др.

Научная новизна работы

1. Разработана технологическая схема солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя с применением электромагнитного клапана и реле-регулятора.

2. Обоснованы оптимальные конструктивные параметры и технологические рабочие режимы ФЭТМ при функционировании в составе солнечной

когенерационной установки с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя, а также в комбинации с ТН.

3. Создана математическая модель ФЭТМ, определяющая его выработку при работе в составе разработанной технологической схемы с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя.

4. Проведен комплекс исследований параметров разработанных макетов ФЭТМ и солнечной когенерационной установки в процессе их функционирования в сопоставлении с результатами мониторинга метеопараметров, синхронизированных по времени.

Практическая значимость исследований состоит в формировании научно обоснованного подхода к выработке технических условий для разработки опытного образца ФЭТМ, а также для выбора технологических режимов эксплуатации данного модуля в зависимости от различных соотношений производства тепловой и электрической энергии.

Предложенная в диссертационном исследовании схема работы солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ обеспечивает в сравнении с установками с принудительной циркуляцией теплоносителя повышение эффективности производства и снижение себестоимости электроэнергии.

Разработанная математическая модель ФЭТМ позволяет проводить различные исследования, позволяющие оптимизировать некоторые параметры солнечной когенерационной установки, а также моделировать выработку энергии макетом установки с учётом его работы по предложенной схеме.

Выработанные подходы работы ФЭТМ с ТН позволяют оптимальным образом использовать характеристики обеих установок, повышая общую эффективность такого рода комбинированных систем.

При использовании ФЭТМ совместно с ФЭМ для повышения уровня покрытия электрической нагрузки предложен механизм установки двухкоординатного слежения за положением солнца с одним электродвигателем, который позволяет осуществить поворот приемной панели модулей как по горизонтальной, так и по вертикальной оси. Использование разработанной системы слежения за солнцем позволяет при минимальных расходах на собственные нужды существенно повысить выработку электрической энергии.

Разработанный для исследования ФЭТМ комплекс мониторинга позволяет осуществлять измерение параметров различного рода установок на основе ВИЭ, а также метеопараметров в режиме реального времени.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Использование разработанной солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя с применением электромагнитного клапана и реле-регулятора позволяет повысить эффективность производства электроэнергии в сравнении с установками с принудительной циркуляцией теплоносителя.

2. Разработанная технологическая схема солнечной когенерационной установки с системой автоматики обеспечивает контроль различных режимов работы ФЭТМ в зависимости от технологических требований потребителя.

3. Проведённые исследования показывают, что толщина резервуара ФЭТМ является одним из важнейших параметров, и при выборе её значения необходимо учитывать режимы работы и климатические особенности места эксплуатации.

4. Предложенная математическая модель ФЭТМ адекватно отражает происходящие в нём процессы и позволяет прогнозировать выработку электрической и тепловой энергии солнечной установкой при применении разработанной технологической схемы.

Достоверность научных результатов подтверждается экспериментальными данными, полученными на макете солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ, которые соответствуют теоретическим.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – от современной науки к технике будущего» (г. Москва, ВВЦ, 2009), 7-й международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2010), международной научно-практической конференции «Перспективные направления альтернативной энергетики и энергосберегающие технологии» (г. Чимкент, Казахстан, 2010), 4-ой международной конференции «TAE 2010, Trends in Agricultural Engineering» (Prague, Czech Republic, 2010), 5-ой международной конференции «Electrical and Control Technologies, ECT-2010» (Kaunas, Lietuva, 2010), 6-ой международной конференции «Material science and condenced Matter Physics», (Chisinau, Moldova, 2012), IX международной ежегодной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2012» (г. Москва, Экспоцентр, 2012), международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (г. Минск, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2012), 8-ой Всероссийской научной молодёжной школе с международным участием «Возобновляемые источники энергии» (г. Москва, МГУ, 2012).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 23 печатные работы, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, получены 2 патента РФ на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста. Она содержит 69 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 144 наименований и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Обзор основных типов и характеристик фотоэлектрических тепловых модулей и установок на их основе» приведен обзор ФЭТМ и установок на их основе, проанализированы тенденции развития фотоэлектрических технологий и гелиоводонагревательных установок. Представлены основные виды фотоэлектрических тепловых систем, их конструкции, рабочие схемы. Рассмотрены основные научные исследования в этой области. Отмечен вклад различных ученых в развитие установок на основе ФЭТМ.

Проведённый обзор позволил определить задачи исследования.

Во второй главе «Исследование фотоэлектрического теплового модуля и различных установок на его основе» представлены и описаны распределение энергии в ФЭ панели ФЭТМ, режимы работы и разработанная схема для ФЭТМ, математическое моделирование и результаты теоретических исследований солнечной когенерационной установки, механизм установки слежения за положением солнца, влияние температуры на напряжение холостого хода ФЭП в интервале более высоких температур, чем в ранее проводимых исследованиях, рассмотрены режимы использования ФЭТМ с ТН.

Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на основе спектральной фотонной плотности СИ в когенерационном ФЭТМ показала высокую долю тепловой энергии, образующейся в полупроводнике при поглощении СИ (рисунок 1, доля оптических потерь энергии СИ, которая составила 14 %, на рисунке не представлена). Реализованный подход для оценки распределения энергии позволил оценить различные структуры ФЭП, а также спрогнозировать повышение выработки при изменении его структуры.

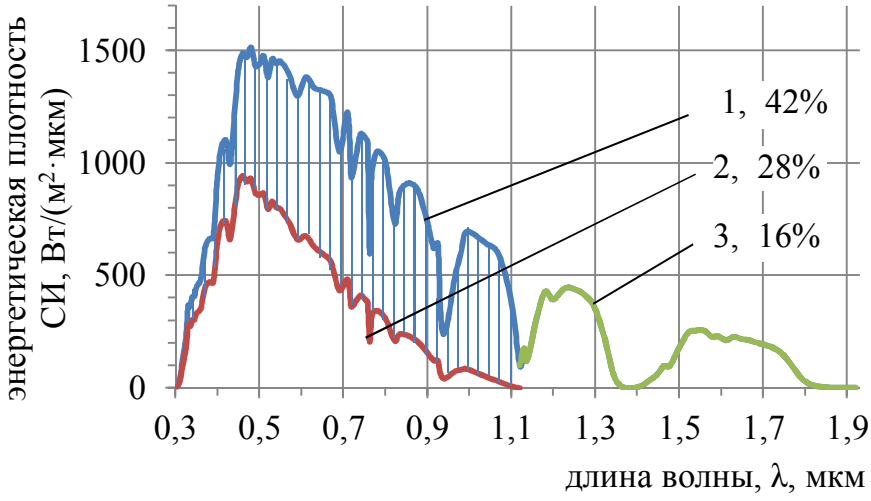

Рисунок 1 – Спектральное распределение энергии стандартного СИ в фотоэлектрической панели: 1– доля СИ, поглощённого ФЭП; 2 – доля СИ, преобразованного в тепло в структуре ФЭП; 3 – доля СИ длинноволновой части спектра, пропущенного структурой ФЭП

Потребности в энергии различных объектов приводят разработчиков к необходимости создания ФЭТМ со строго установленными требованиями по мощности производимого тепла и электричества, а также их соотношению. В зависимости от необходимых технологических требований потребителей, с учётом обеспечения необходимой температуры теплоносителя на выходе ФЭТМ, выработано три основных режима его работы:

- обеспечение максимально эффективной выработки электроэнергии;
- обеспечение максимально эффективной выработки тепловой энергии;
- обеспечение максимальной суммарной эффективности.

Выбранный режим работы оказывает существенное влияние на конструкцию устройства и дополнительного оборудования, используемого в системе. В связи с этим были выработаны критерии, определяющие установки, предназначенные для определённого режима эксплуатации.

С учётом специфики некоторых сельскохозяйственных потребителей, а также с целью повышения фотоэлектрической эффективности была изобретена и предложена для использования новая технологическая схема функционирования ФЭТМ в составе солнечной когенерационной установки (рисунок 2). Особенностью установки является принцип работы ФЭТМ, согласно которому в нём обеспечивается предварительный подогрев жидкости для дальнейшего её нагрева в СК. Такое техническое решение обеспечивает повышенный отвод от ФЭ панели ФЭТМ тепловой энергии с одновременным подогревом холодной жидкости.

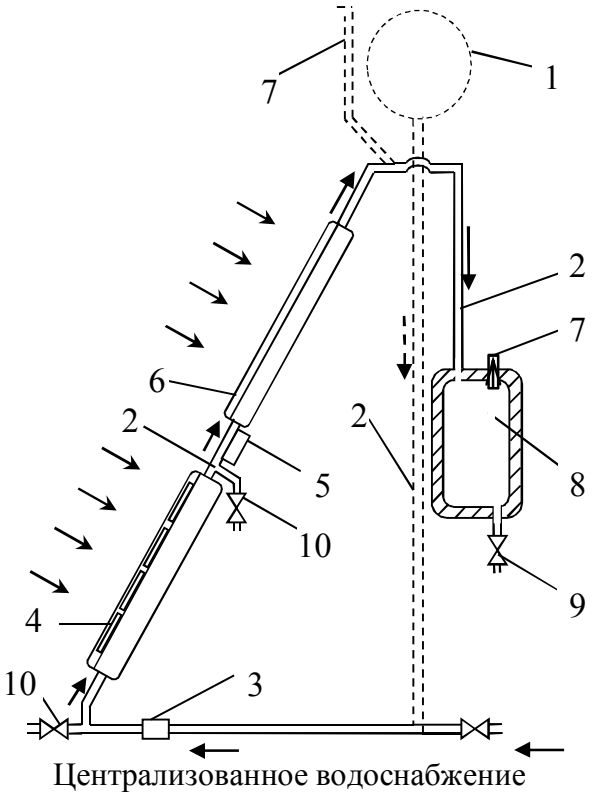

Рисунок 2 – Функциональная схема солнечной когенерационной установки: 1 – напорный бак; 2 – трубопровод; 3 – электромагнитный клапан; 4 – ФЭТМ; 5 – термореле; 6 – СК; 7 – воздушный клапан; 8 – бак-аккумулятор; 9, 10 – вентили

Работа гелиоустановки осуществляется следующим образом. При нагреве жидкости в резервуаре ФЭТМ (рисунок 3) или СК (в зависимости от того, где установлен датчик температуры) до заданной на термореле температуры открывается электромагнитный клапан, и холодная жидкость из водопровода (или напорного бака) поступает в резервуар ФЭТМ, вытесняя нагретую жидкость из него в резервуар СК через трубопровод. Из резервуара СК нагретая жидкость поступает по трубопроводу в бак-аккумулятор (термос). Течение жидкости по контуру от напорного бака до бака-аккумулятора осуществляется, пока её температура не опустится ниже заданного уровня и не сработает термореле, которое разомкнет управляющий сигнал электромагнитного клапана, тем самым остановив движение жидкости по контуру.

Благодаря разработанной схеме и регулировке температуры с помощью термореле появляется возможность реализовать различные режимы функционирования фотоэлектрической тепловой установки (ФЭТУ). Изменять режимы работы установки можно и за счёт

варьирования зазора между прозрачной изоляцией (стеклом) и ФЭ панелью модуля. Режим работы ФЭТУ определяет также место установки датчиков термореле. В первом режиме датчик расположен в резервуаре ФЭТМ у выходного патрубка, вследствие чего с помощью термореле температура ФЭ панели модуля не будет превышать заданного значения. Во втором режиме работы датчик температуры расположен в резервуаре СК у выходного патрубка, вследствие чего в течение всего дня обеспечивается выработка горячей воды с заданной температурой. При этом режиме температура ФЭ панели в течение дня может колебаться, особенно в облачную погоду.

Исходя из технологических особенностей предложенной схемы, СК должен иметь меньший объем резервуара и высокие теплотехнические и оптические характеристики материалов, используемых в его конструкции.

Рассмотренные режимы позволяют потребителю получать требуемое соотношение производимой тепловой и электрической энергии в зависимости от текущей необходимости.

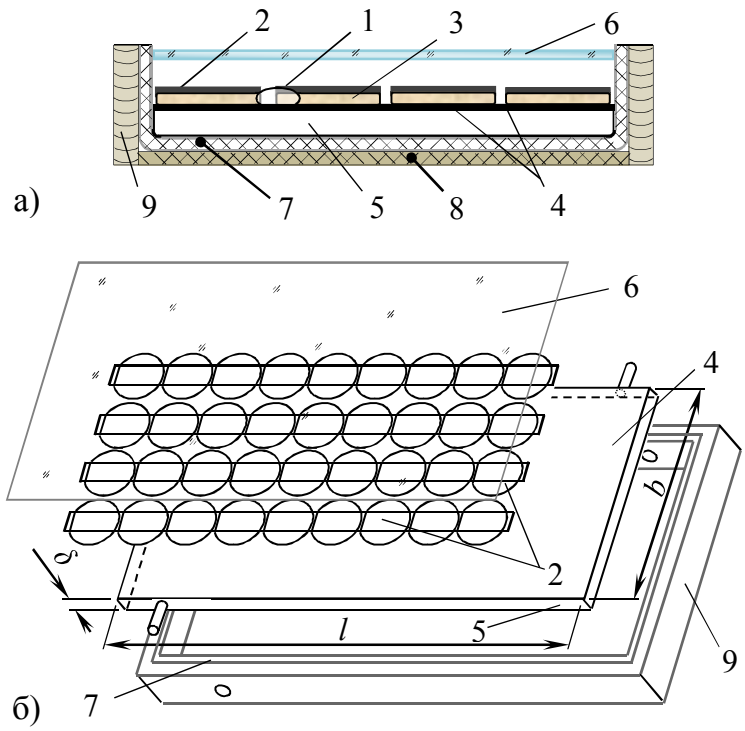

Рисунок 3 – Макет ФЭТМ:
а) поперечный разрез макета; б) составной чертеж
1 – фотоприемник; 2 – СЭ (ФЭП);
3 – скрепляющее вещество; 4 – тепловой абсорбер;
5 – резервуар с теплоносителем;
6 – остекление; 7 – изоляционный материал №1;
8 – изоляционный материал №2; 9 – корпус;
l – длина, b – ширина, δ – толщина резервуара

Выбор оптимальных площадей ФЭТМ и СК когенерационной установки с целью обеспечения заданных выходных температур в рассмотренных режимах работы осуществляется исходя из равенства объемов производства ими нагретой воды с учётом характеристик оборудования и условий эксплуатации установки. Специфика выбора описана в главе 4.

Среди основных преимуществ разработанной ФЭТУ по сравнению с установками с принудительной циркуляцией теплоносителя следует выделить повышение эффективности производства электроэнергии до 19 % (для кристаллических кремниевых СЭ) и снижение капитальных затрат (отсутствие насоса). Это связано с рядом технологических особенностей. Поскольку электромагнитный клапан потребляет намного меньше энергии в сравнении с насосом, снижено

потребление энергии на собственные нужды. Следующая особенность связана с тем, что в течение дня температура воды в баке-аккумуляторе гелиоустановки с циркуляцией непрерывно растет (если нет потребления днём), что приводит к ухудшению охлаждения ФЭ панели ФЭТМ. Снижение тепловой эффективности может составлять 20-30 %. В разработанной ФЭТУ нет зависимости от объема бака-аккумулятора, что позволяет повысить электрическую эффективность на 12-19 %.

В предлагаемой ФЭТУ основополагающими параметрами, влияющими на характеристики ФЭТМ, являются толщина (расстояние от теплового абсорбера до противоположной параллельной тыльной стенки резервуара) и высота резервуара (см. рисунок 3). Поэтому были проведены теоретические исследования влияния этих параметров на эффективность работы ФЭТМ с помощью математической модели в программе ANSYS.

В результате моделирования были получены характеристики, отражающие влияние толщины резервуара (5, 10, 20 и 50 мм) ФЭТМ на скорость восходящего потока у нагретой поверхности и вертикальное распределение температуры абсорбера при температуре жидкости в верхней части резервуара 35 °С (рисунок 4). Нагрев жидкости начинался с 15 °С. Отметим, что скорость потока жидкости и температура абсорбера в резервуаре ФЭТМ являются одними из основных факторов, влияющих как на тепловую, так и на электрическую эффективность. Высота исследуемого резервуара была принята равной 430 мм с учётом высоты экспериментального макета ФЭТМ.

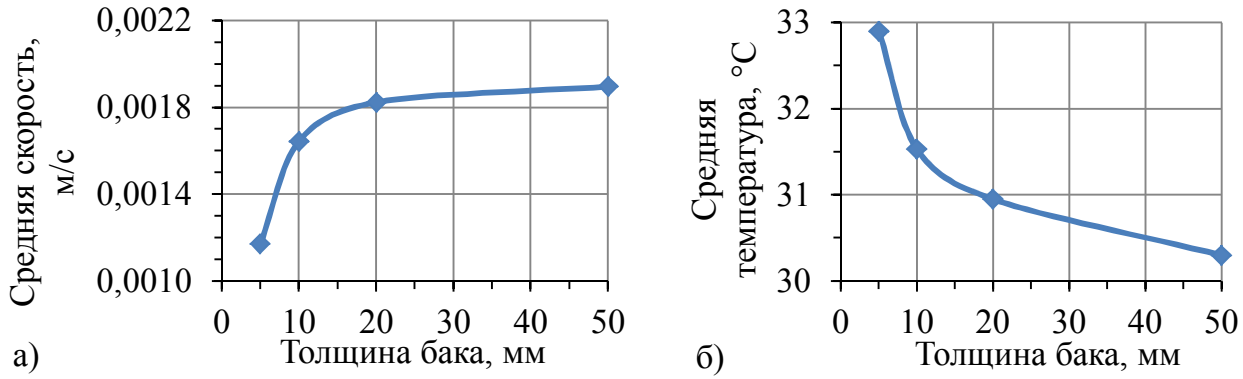

Рисунок 4 – Зависимость средней скорости восходящего потока воды (а) и средней температуры абсорбера (б) в резервуаре ФЭТМ от толщины резервуара

Как показано на рисунке 4, зависимости средней температуры теплового абсорбера резервуара и средней скорости восходящего у его поверхности потока жидкости от толщины бака являются нелинейными, и с ростом толщины бака эти величины стремятся к определённым значениям. Увеличение толщины бака свыше 20 мм приводит к незначительному изменению рассматриваемых параметров, но при этом существенно увеличивается время нагрева теплоносителя до 35 °С, что было теоретически и экспериментально показано. На основании приведённых данных рекомендуемая оптимальная толщина резервуара для ФЭТМ, использующих в

составе разработанной солнечной когенерационной установки, должна быть равна 10-20 мм.

Во время работы ФЭТМ разность температур между слоями жидкости в верхней и нижней части резервуара, как показали теоретические и экспериментальные данные, зависит в основном от высоты резервуара и температуры жидкости в напорном баке или водопроводе. Поскольку производители гелиоустановок, в качестве теплоносителя в которых применяется вода, рекомендуют прекращать работу установки при температуре окружающей среды 3 °С, то самая низкая температура жидкости в модуле будет соответствовать данной температуре.

Проведённый анализ теоретических и экспериментальных данных позволил сделать вывод, что при толщине бака около 10 – 20 мм и нагреве воды от 3 °С до 35 °С высота резервуара должна быть свыше 2000 мм, чтобы температура в нижних слоях резервуара мало отличалась от 3 °С. Такой режим будет являться оптимальным для ФЭТМ, поскольку и до начала работы порционного слива нагретой и залива холодной воды в резервуаре в нижних слоях температура будет несущественно изменяться. При этом нужно учитывать, что модуль свыше 2000 мм доставляет значительные неудобства при его монтаже и эксплуатации, кроме того, в мировой практике длина коммерчески реализуемых модулей зачастую также составляет около 2000 мм. На основании этого рекомендуемая высота (длина по вертикали) резервуара ФЭТМ с толщиной 10-20 мм должна составлять около 2000 мм.

В главе также описана математическая модель, моделирующая выработку тепловой и электрической энергии макетом ФЭТМ, работающим по разработанной технологической схеме с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя. Она была реализована в программе MATLAB. Геометрические параметры резервуара (бака) макета ФЭТМ (см. рисунок 3) следующие: длина – 961 мм, ширина – 431 мм и толщина – 48 мм без учёта стенок бака.

Математическая модель ФЭТМ базируется на уравнении (1), составленном на основе того, что поток СИ $Q_{пад.изл}$ (Вт), падающий на его рабочую поверхность, с учётом оптических $Q_{опт.пот}$ и тепловых потерь $Q_{тепл.пот}$, преобразуется частично в электрическую энергию $Q_{эл}$ и частично – в тепловую для нагрева жидкости $Q_{пол.тепл}$.

$$Q_{пол.тепл} = Q_{пад.изл} - Q_{опт.пот} - Q_{эл} - Q_{тепл.пот}. \quad (1)$$

Входящие в состав системы уравнений переменные определяются согласно известным выражениям. Решение производится методом итераций. После нахождения всех необходимых параметров выражения (1), находится значение КПД тепловой части ФЭТМ в определённый квазистационарный момент времени согласно выражению:

$$\eta_{тепл} = \frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{пад.изл}} = \frac{Q_{пад.изл} - Q_{опт.пот} - Q_{эл} - Q_{тепл.пот}}{Q_{пад.изл}}. \quad (2)$$

Выражение для определения величины КПД ФЭ части модуля имеет вид:

$$\eta_{эл} = \frac{Q_{эл}}{Q_{пад.изл}}. \quad (3)$$

При моделировании работы ФЭТМ расчётное время разделяется на равные промежутки с интервалом одна минута (при необходимости интервал можно изменить). Сначала задаётся начальное значение температуры воды в баке (в середине бака) $T_{в.бак}$ (в последующем она определяется в процессе моделирования). Затем на основе этой температуры, а также данных, характеризующих условия эксплуатации, находится энергия, направленная на нагрев жидкости $Q_{пол.тепл}$. С учётом этой энергии вычисляется значение температуры воды в баке $T'_{в.бак}$ в конце шага моделирования, т.е. через одну минуту:

$$T'_{в.бак} = T_{в.бак} + \frac{Q^{мин}_{пол.тепл}}{C_в \cdot m_{жид.бак}}, \quad (4)$$

где $T'_{в.бак}$ – температура воды в середине бака в конце шага моделирования, °С; $T_{в.бак}$ – температура воды в середине бака в начале шага моделирования, °С; $Q^{мин}_{пол.тепл}$ – доля энергии, идущая на нагрев жидкости за интервал времени равный одной минуте, Дж; $C_в$ – удельная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·°С); $m_{жид.бак}$ – общая масса жидкости в баке, кг.

Рассчитанные согласно первой части математической модели данные основных характеристик макета ФЭТМ представлены на рисунках 5, 6.

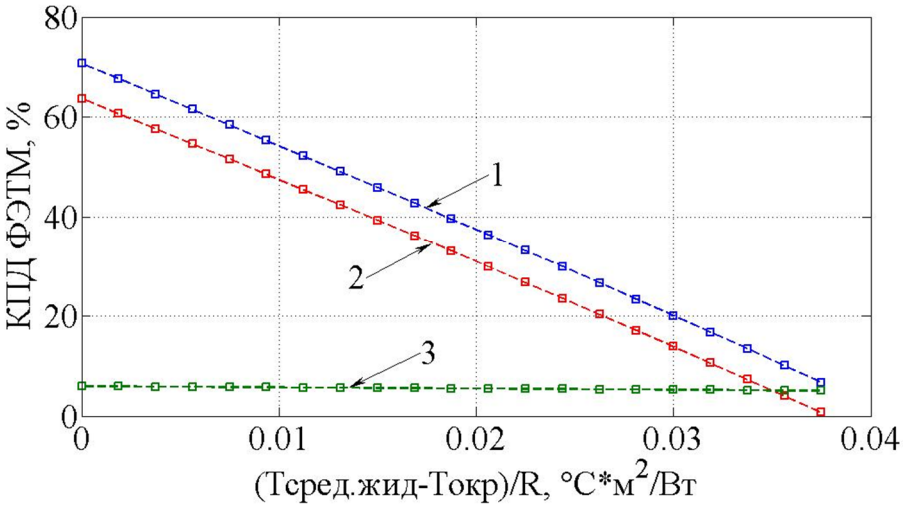

Рисунок 5 – Расчётные зависимости величин КПД ФЭТМ от средней температуры жидкости (Тсред.жид), температуры окружающей среды (Токр) и интенсивности СИ (R): 1 – суммарный КПД; 2 – КПД тепловой части; 3 – КПД фотоэлектрической части модуля

С целью анализа работы макета ФЭТМ во время дозированного слива и залива жидкости была создана вторая часть математической модели, описывающая его работу в течение определенного дня.

В процессе теоретических и натурных исследований описываемого макета ФЭТМ по мере нагрева в нём жидкости наблюдается её температурное расслоение по высоте резервуара, причём оно имеет характер, близкий к линейному. Кроме того, после начала процесса слива и залива воды наблюдается изменение разницы температуры между верхним и средним слоем жидкости в баке. Последний факт объясняется непосредственно началом процесса слива-залива воды. После стабилизации нового режима разность температур в верхнем и среднем слое бака должна становиться

постоянной. Однако на разнице температур сказывается залив воды с постоянно возрастающей температурой (вследствие постепенного нагрева её в напорном баке).

Тогда на основании линейного характера температурного расслоения температура жидкости в верхнем слое резервуара перед сливом воды определяется следующим образом:

$$T_{жид.в.с}^{д.сл-зал} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{бака}, \quad (5)$$

где $T_{жид.в.с}^{д.сл-зал}$ – температура верхнего слоя жидкости в баке до начала процесса слива-залива воды, °С; k_T – коэффициент, равный соответственно $k_T = \Delta T_{бака} / h_{бака}$; $h_{бака}$ – половина высоты бака, м; $\Delta T_{бака}$ – разность температур между верхним и средним слоем воды в баке перед сливом, °С.

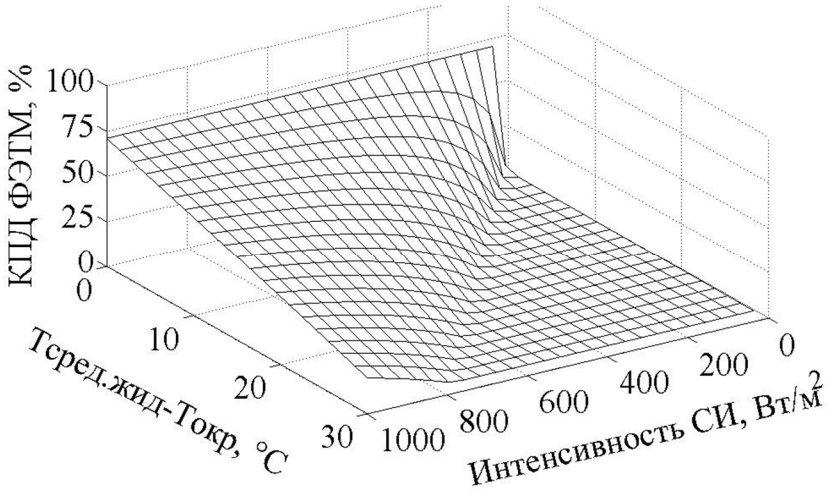

Рисунок 6 – Расчётные зависимости величин суммарного КПД ФЭТМ от средней температуры жидкости, окружающей среды и интенсивности СИ (3D)

Согласно рабочей схеме установки при достижении нагреваемой жидкостью в верхнем слое резервуара температуры равной $T_{откр.клап}$, установленной на термореле, срабатывает электромагнитный клапан, и начинается слив воды. Слив продолжается до тех пор, пока температура сливаемой жидкости не опустится ниже второго заданного на термореле значения температуры $T_{закр.клап}$. Соответственно, температура верхнего слоя жидкости в баке в конце шага моделирования, найденная по выражению (5), проверяется на условие $T_{жид.в.с}^{д.сл-зал} > T_{откр.клап}$. Если данное условие не выполняется, значит процесс нагрева жидкости продолжается до того момента, пока не будет выполнено это условие, означающее начало процесса слива-залива воды.

В новых условиях температура жидкости в верхнем слое резервуара находится с учётом поправки на изменение разницы температуры в верхнем и среднем слое бака следующим образом:

$$T_{жид.в.с}^{п.сл-зал} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{бака} + k'_T \cdot T_{жид.нап.бак}, \quad (6)$$

где k'_T – эмпирический коэффициент, определяющий влияние температуры жидкости в напорном баке (водопроводе) на разницу температуры в верхнем и среднем слое бака, о.е.; $T_{жид.нап.бак}$ – температура жидкости в напорном баке, °С.

Процесс слива и залива жидкости разделяется на два условных (поскольку процесс слива и залива воды происходит одновременно) этапа. На первом этапе

происходит слив жидкости. После слива за одну минуту с учётом принятого расхода (около 0,6 л/мин) высота (условная) оставшейся жидкости относительно среднего слоя жидкости в резервуаре модуля составит:

$$h_{усл} = h_{бака} - \frac{g_{расх}}{l \cdot \delta}, \quad (7)$$

где $g_{расх}$ – расход жидкости, м^3; l – длина резервуара ФЭТМ, м; δ – толщина резервуара ФЭТМ, м.

Тогда температура жидкости в верхнем слое после слива находится исходя из линейности температурного расслоения следующим образом:

$$T^{п.сл}_{жид.в.с} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{усл} + k'_T \cdot T_{жид.нап.бак}. \quad (8)$$

В свою очередь средняя температура оставшейся жидкости в баке будет равна:

$$T^{п.сл1}_{жид.с.с} = T^{д.сл}_{жид.с.с} - 0{,}5 \cdot \left(T^{д.сл}_{жид.в.с} - T^{п.сл}_{жид.в.с}\right), \quad (9)$$

где $T^{д.сл}_{жид.в.с}$ – температура верхнего слоя жидкости в баке в начале шага моделирования, °С; $T^{д.сл}_{жид.с.с}$ – температура среднего слоя жидкости в баке в начале шага моделирования, °С.

На втором этапе происходит залив жидкости в резервуар ФЭТМ, после чего средняя температура жидкости может быть найдена как:

$$T^{п.сл2}_{жид.с.с} = \frac{\left(m_{зал.жид} \cdot T_{жид.нап.бак} + \left(m_{жид.бак} - m_{зал.жид}\right) \cdot T^{п.сл1}_{жид.с.с}\right)}{m_{жид.бак}}, \quad (10)$$

где $m_{зал.жид}$ – масса жидкости, заливаемой в резервуар за одну минуту, определяется исходя из расхода жидкости, кг.

Таким образом, после начала процесса слива-залива воды температура верхнего слоя жидкости в баке в конце шага моделирования находится по выражению (6). Затем при выполнении условия $T^{п.сл-зал}_{жид.в.с} > T_{откр.клап}$ или $T^{п.сл-зал}_{жид.в.с} > T_{закр.клап}$, если в предыдущий шаг моделирования выполнялось первое условие ($T^{п.сл-зал}_{жид.в.с} > T_{откр.клап}$), по уравнениям (7-10) находится $T^{п.сл2}_{жид.с.с}$. После чего $T^{п.сл2}_{жид.с.с}$ принимается равной температуре бака $T_{в.бак}$, и начинается новый шаг моделирования. Если же вышеперечисленные условия не выполняются, т.е. клапан закрыт, $T_{в.бак}$ принимается равной $T'_{в.бак}$, найденной по выражению (4), и выполняется следующий шаг моделирования. Процесс завершается по истечении заданного времени моделирования.

В моменты дозированного слива и залива жидкости изменения физических процессов (конвекции) в резервуаре ФЭТМ можно считать незначительными из-за невысокой (0,6 л/мин) скорости потока при сливе (заливе) жидкости. Для сравнения данных математической модели с экспериментальными была проведена серия испытаний. Аналитическое сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования показало, что они весьма близки. На рисунке 7 представлены результаты одного из дней проведённых натурных экспериментов вместе со смоделированными для данных условий показателями изменения

температуры жидкости в резервуаре ФЭТМ. Расчётные результаты получены с учётом измеренных значений СИ, температуры окружающей среды и скорости ветра, мониторинг которых производился 20.09.2012.

Как видно, смоделированные температуры жидкости в центре и в верхней части бака соответствуют фактическим температурам жидкости в баке. Основные отклонения опытных данных от смоделированных в течение рассмотренного периода времени не превышают 5%.

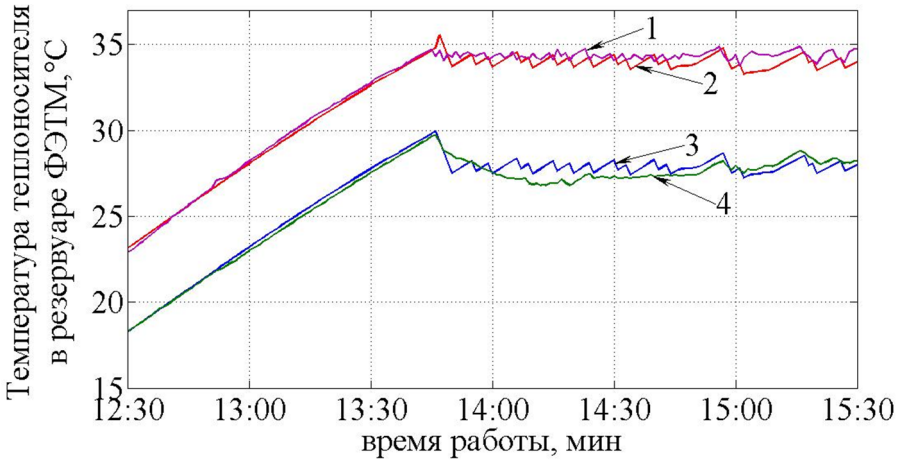

Рисунок 7 – Изменение температуры воды в резервуаре в период работы ФЭТМ: 1 – фактическая температура воды в верхних слоях; 2 – расчётная температура воды в верхних слоях; 3 – расчётная температура воды в средних слоях; 4 – фактическая температура воды в средних слоях

Хорошо видна работа клапана, который начинает функционировать при достижении температуры воды около 35 °С.

С точки зрения практического использования ФЭТУ прогнозируется недостаток в объеме вырабатываемой электрической энергии для нужд потребителя. Связано это с тем, что первоначально именно выработка тепловой энергии является преобладающей, и выбор площадей ФЭТМ и СК производится исходя из покрытия тепловой нагрузки. Поэтому для покрытия электрической нагрузки требуется использование дополнительных мощностей, в качестве которых могут использоваться ФЭМ. Одним из способов повышения эффективности ФЭМ (гелиоустановок) является использование систем слежения за положением солнца. Применение в некоторых регионах Российской Федерации систем слежения за положением солнца увеличивает эффективность отбора мощности от СЭ на 30 %. Установки двухкоординатного слежения обычно характеризуются наличием двух электродвигателей и вследствие этого сложной механической конструкцией и управляющим аппаратом. Поэтому был разработан механизм установки двухкоординатного слежения за положением солнца с одним электродвигателем и изготовлен её макет. Задачей установки является осуществление слежения за солнцем его приемной панелью по азимутальным и зенитальным (угол возвышения) параметрам в течение светового дня с использованием одного электродвигателя. Общий вид установки представлен на рисунке 8.

При засветке лучами солнца элементов датчика солнечной ориентации сигналы от него поступают на блок автоматического управления. После обработки сигнала блок осуществляет управление реверсивным электродвигателем, подавая на

него напряжение заданной полярности. Через редуктор электродвигатель приводит в движение поворотную раму, жестко связанную с вертикальным валом, который шарнирно закреплен на станине.

В зависимости от полярности напряжения за счёт двигателя происходит изменение положения поворотной рамы по азимуту влево или вправо относительно линии вертикали. К раме с помощью шарниров закреплена приёмная панель, которая перемещается по азимуту совместно с рамой. В свою очередь панель за счёт шарниров перемещается относительно линии горизонта. Во время процесса слежения при перемещении поворотной рамы по азимуту автоматически происходит поворот панели и по углу возвышения за счёт изменения положения стержня, один конец которого шарнирно связан со станиной, а другой – с приёмной панелью (см. рисунок 8). Таким образом, происходит изменение положения приёмной панели по углу возвышения относительно вертикали и по азимуту относительно горизонтали. Блок автоматического управления и датчик солнечной ориентации разрабатывались таким образом, чтобы установка осуществляла изменение положения приёмной панели вместе с ФЭМ один раз в час.

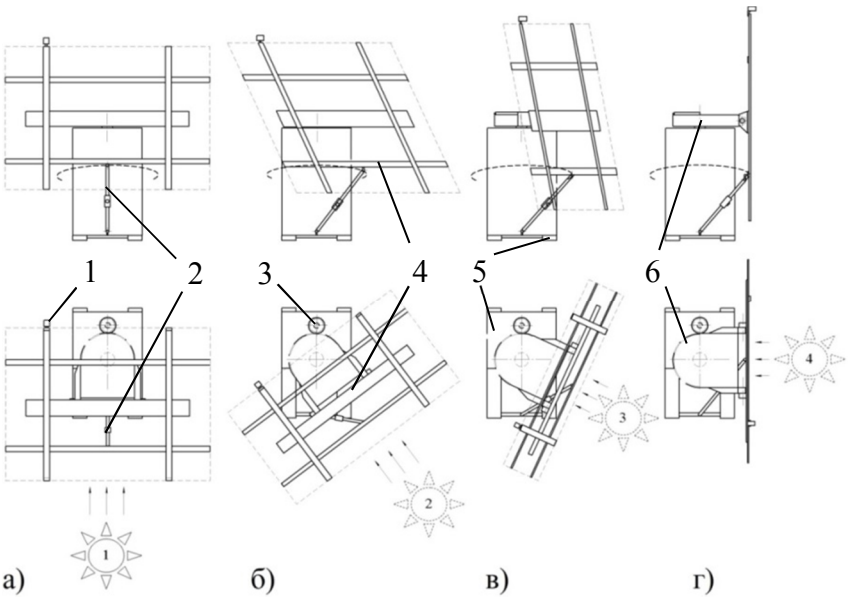

Рисунок 8 – Положения приемной панели установки (вид спереди и сверху) а) при максимальном угле возвышения солнца для данной местности; б), в) при некотором отклонении солнца от максимума; г) при восходе солнца
1 – датчик солнечной ориентации; 2 – стержень;
3 – вертикальный вал; 4 – приемная панель;
5 – станина; 6 – поворотная рама

Одним из путей повышения эффективности ФЭТМ также является совместное его использование с ТН. Анализ параметров данных установок показал, что возможны три режима работы ФЭТМ с ТН. Оптимальным является режим работы, когда ФЭТМ производит $Q_{пол.тепл}$ и $Q_{эл}$ в соотношении, обеспечивающем полное использование энергии, произведённой в ТН:

$$\frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{эл}} = K_{тр}\,, \qquad (11)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации ТН.

Для обеспечения данного режима найден подход, позволяющий, с учётом необходимой разницы температур нагрева теплоносителя системой на основе ФЭТМ и ТН, определять оптимальную разность температур (температуру), до которой должен подогревать ФЭТМ. На рисунке 9 представлена зависимость оптимальной разности температур, полученная согласно условию (11).

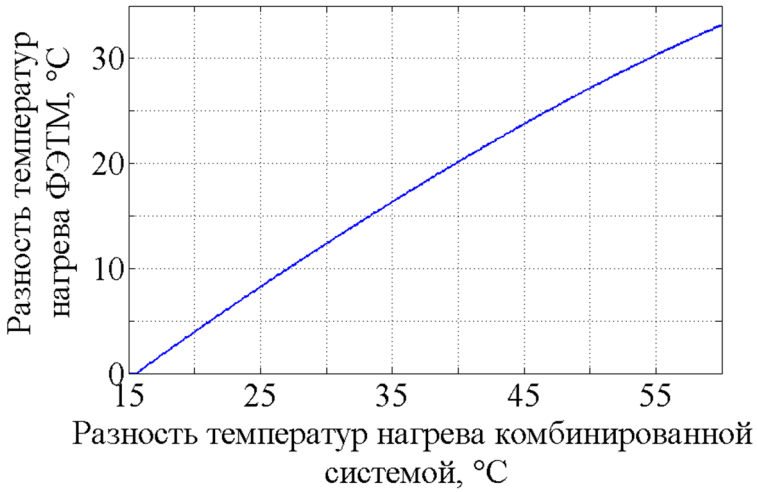

Рисунок 9 – Необходимая (оптимальная) разность температур нагрева теплоносителя ФЭТМ в зависимости от разности температур (начальной и конечной) нагрева его комбинированной системой на основе ФЭТМ и ТН

В третьей главе «Исследование экспериментального плоского фотоэлектрического теплового модуля» показаны средства практического исследования гелиоустановок, результаты натурных исследований работы ФЭТМ, а также солнечной когенерационной установки. При проведении натурных исследований экспериментального образца ФЭТМ, а также различных гелиоустановок, необходимо было обеспечить сопоставимость получаемых результатов, адекватность их интерпретации и точность исследования, для чего желательно отслеживать процессы в динамике. В связи с этим была создана система мониторинга основных параметров гелиоустановки с ФЭП. Система позволяет получать основную информацию о состоянии гелиоустановки в динамике (температуру основных узлов установки, напряжение холостого хода U_{XX} и ток короткого замыкания I_{K3}) с учётом прихода солнечной энергии (показания пиранометров). В состав системы также вошло оборудование для постоянного мониторинга метеопараметров.

А поскольку при испытаниях экспериментального образца ФЭТМ также возникла необходимость исследовать в динамике электрические параметры нескольких цепей (рядов) ФЭ панели различного напряжения от 5 В до 36 В, то было разработано и вошло в состав системы устройство, позволяющее определять потенциальную выработку электроэнергии ФЭ панелью с использованием параметров U_{XX} и I_{K3}.

В основе способа мониторинга потенциальной выработки электроэнергии лежит следующее выражение:

$$W_{СБ} = P_{СБ} \cdot t = U_{XX} \cdot I_{КЗ} \cdot FF \cdot t, \quad (11)$$

где FF – фил-фактора, о.е.; t – время, с.

Для управления устройством было написано программное обеспечение на языке графического программирования LabVIEW со следующими функциями: управление элементами цепи, обработка, вывод, запись и хранение данных. Значение FF определялось расчётным методом.

Натурные эксперименты проводились на испытательной площадке ГНУ ВИЭСХ (г. Москва) с июня по сентябрь 2011 и 2012 гг. В процессе натурных исследований был накоплен большой объем экспериментальных данных. Представленные результаты, связанные как с макетом ФЭТМ, так и с макетом разработанной солнечной когенерационной установки, многократно подтверждались в ходе проведения экспериментов. Экспериментальный ФЭТМ и СК, входящие в состав ФЭТУ, были установлены стационарно и ориентированы на юг, угол наклона приемных панелей соответствовал их ориентации перпендикулярно солнечным лучам в полдень (рисунок 10).

Исследования, проведённые в рамках данной главы, подтвердили перспективность разработанной схемы установки, практичность ФЭТМ и ФЭТУ в целом. Более того, полученные в ходе экспериментов реальные данные позволили подтвердить адекватность математической модели при различных условиях эксплуатации. А наличие такой модели позволяет с высокой степенью соответствия прогнозировать работу макета ФЭТУ. Это важно как с точки зрения оценки выработки энергии ФЭТУ при различных условиях, так и исследования конструкционных особенностей.

Рисунок 10 – Исследуемый макет ФЭТУ

На рисунках 11, 12 приведены данные комплекса мониторинга для одного из натурных экспериментальных дней 22.06.2012. В этот день исследовался процесс нагрева различных элементов ФЭТМ и жидкости в его резервуаре. Согласно плану исследований, процесс слива-залива жидкости в ФЭТМ не производился, а остекление не было установлено. По показаниям видно, насколько сильно характеристики СЭ подвержены влиянию облаков и температуры нагрева ФЭ панели (рисунки 11 и 12).

Разработанное программное обеспечение согласно данным, измеренным системой мониторинга, и выражению (12) рассчитывает потенциальную мощность ФЭ панели в данный момент времени (рисунок 11). Такой способ определения потенциальной выработки электроэнергии позволяет кроме оценки производства фактической панелью оценивать параметры ФЭ панели с другими *FF*, U_{XX} и I_{K3}. На рисунке 11 представлен характер выработки электроэнергии как фактической ФЭ панели, так и панели с *FF* = 0,85, т.е. можно оценить выработку ФЭ панели с более высокими характеристиками.

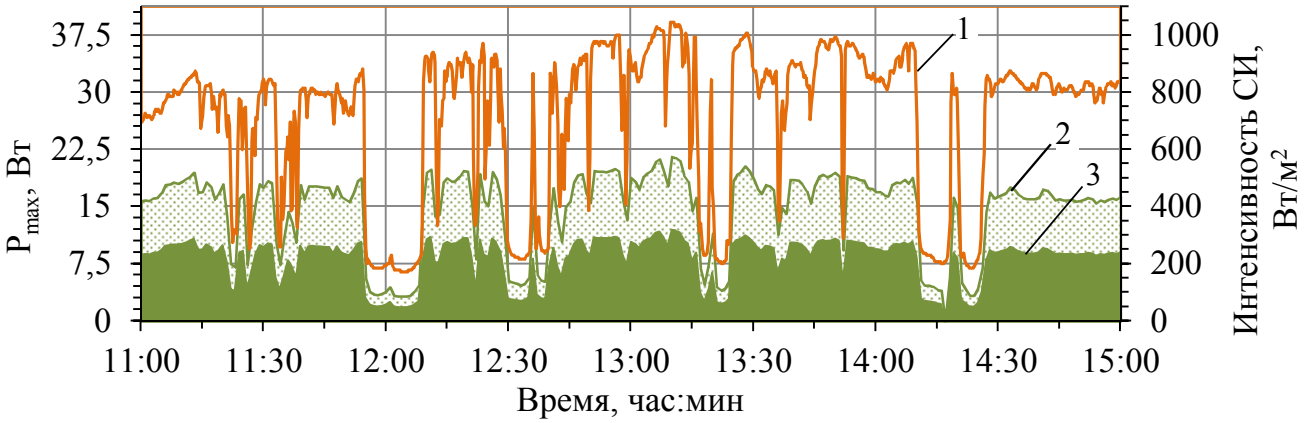

Рисунок 11 – Потенциальная мощность ФЭ панели ФЭТМ в период работы: 1 – интенсивность СИ; 2 – мощность ФЭ панели с *FF* = 0,85; 3 – мощность ФЭ панели с фактическим *FF* = 0,46

Отметим, что даже при высоких значениях интенсивности СИ температура СЭ отличается от температуры абсорбера незначительно, и разность в среднем составляет около 1-2 ºС, что видно по показаниям термодатчиков (рисунок 12). Этот факт свидетельствует о хорошей теплопроводности материалов, используемых для изоляции и фиксации СЭ к абсорберу, а также о том, что для данной конструкции нет необходимости в использовании дорогих материалов, таких как алюминий и медь.

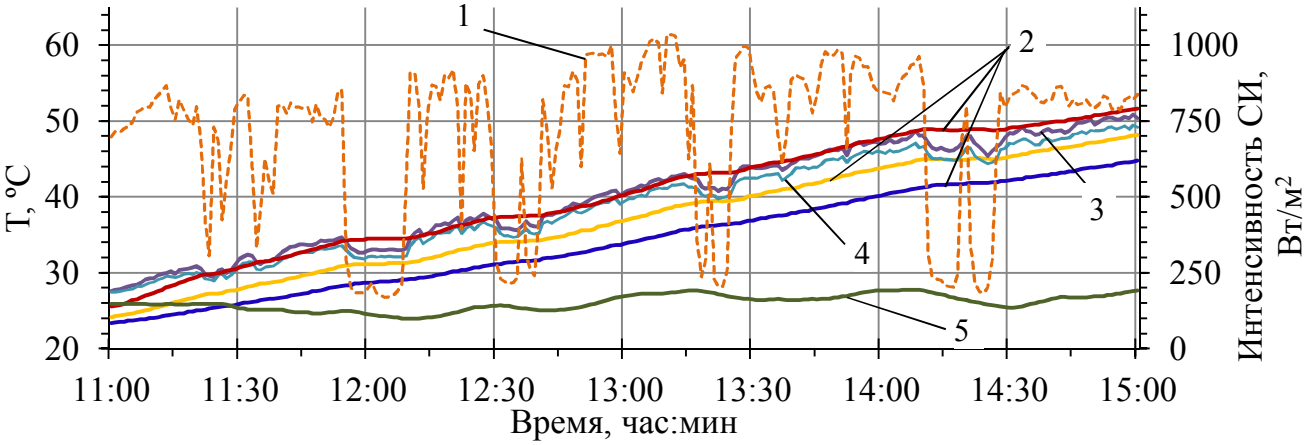

Рисунок 12 – Показания термодатчиков и интенсивности СИ в период работы ФЭТМ: 1 – интенсивность СИ; 2 – температура (кривые сверху вниз) в верхних, средних и нижних слоях жидкости в резервуаре модуля; 3 – средняя температура СЭ; 4 – средняя температура абсорбера; 5 – температура окружающего воздуха

На рисунке 13 сопоставлены данные нагрева жидкости в течение 40 минут в ФЭТМ при его расположении в двух исследуемых положениях: продольном и поперечном. Под продольным предполагается расположение модуля вдоль горизонта относительно его длины, а под поперечным – расположение, когда модуль находится перпендикулярно горизонту относительно его длины. Данные были получены в ходе экспериментов, проведённых 21.06.12 и 12.09.12.

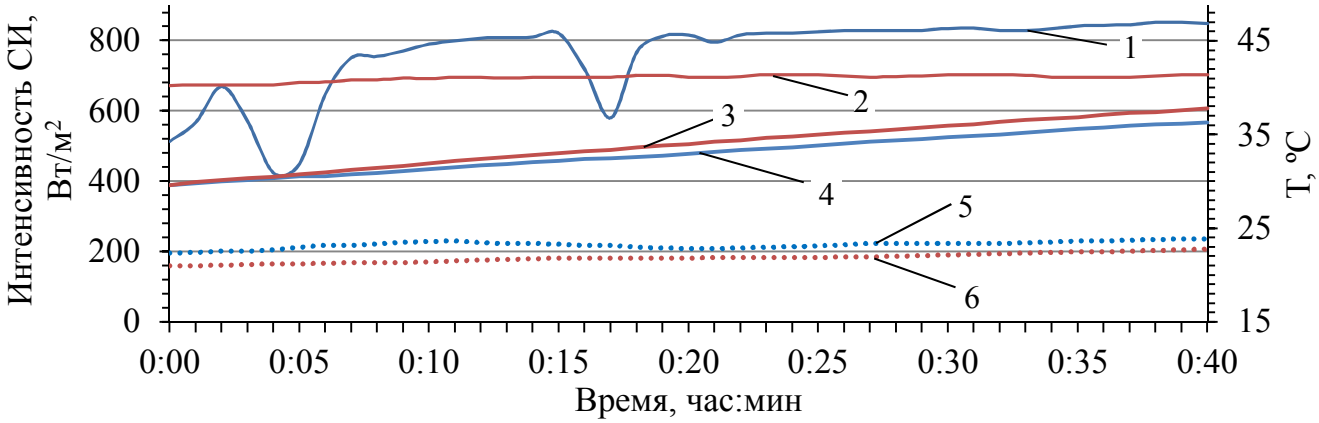

Рисунок 13 – Нагрев воды в верхних слоях резервуара ФЭТМ в продольном расположении (4) при интенсивности СИ (1), температуре окружающей среды (5) и в поперечном расположении (3) при интенсивности СИ (2), температуре среды (6)

Как видно, более длинный путь нагрева жидкости в ФЭТМ, реализующийся при поперечном положении, приводит, по сравнению с продольным, к ускоренному нагреву жидкости в верхних слоях резервуара, что предопределяет более раннее начало срабатывания сливного клапана (рисунок 13), а значит и большую выработку тепловой энергии. Причём нагрев жидкости осуществляется быстрее в поперечном положении ФЭТМ, даже несмотря на меньшую интенсивность СИ (разность в некоторый интервал времени достигает 148 Вт) и меньшую температуру окружающей среды.

Более раннее начало срабатывания клапана особенно важно для облачных дней, поскольку в эти дни часто возникает ситуация, когда длинные по времени периоды с низкой интенсивностью СИ сменяются непродолжительными периодами с высокой интенсивностью. В такие моменты нужно получить максимум энергии от установки, что частично позволяет реализовать поперечное положение ФЭТМ.

Данные одного из экспериментальных дней работы макета ФЭТУ (20.09.12) представлены на рисунках 14 и 15. В этот день жидкость в ФЭТМ поступала из напорного бака, а на модуле и СК было установлено остекление. Установка работала в режиме, при котором датчик расположен в резервуаре ФЭТМ у выходного патрубка, вследствие чего с помощью термореле температура ФЭ панели модуля должна не превышать заданного значения в течение всего периода эксплуатации.

Как можно видеть из экспериментальных данных (рисунок 15), температура абсорбера, а значит и температура СЭ ФЭТМ, не превышает определённого значения, а в моменты снижения интенсивности СИ и вовсе уменьшается.

Со временем, после начала работы клапана, температура в центре абсорбера и жидкости в средних слоях резервуара (кривые 3 и 5, рисунок 15) до определённого

момента снижается (с 13:45 до 14:10), что обусловлено, в основном, потоком холодной жидкости, заливаемой в резервуар, при его высоте 431 мм. Т.е. поток холодной жидкости, поступающей в резервуар, снижает температуру в средних и нижних слоях жидкости, за счёт чего повышается и эффективность СЭ.

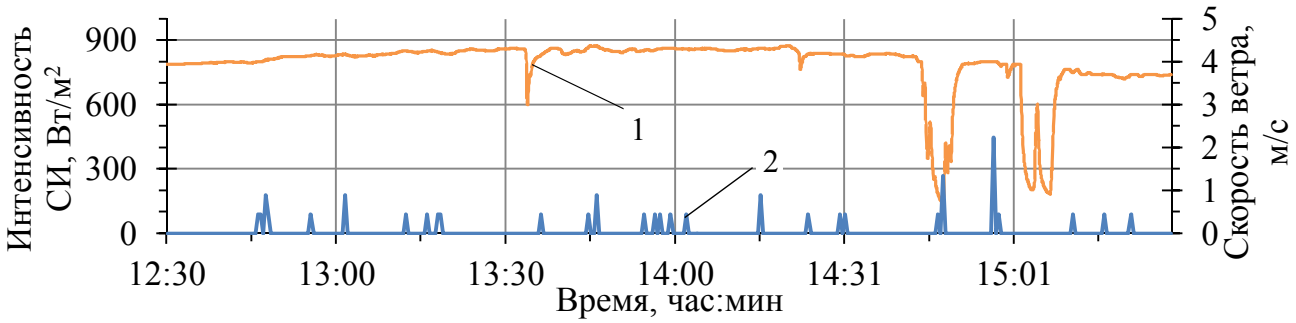

Рисунок 14 – Изменение интенсивности СИ (1) и скорости ветра (2) во время работы ФЭТУ

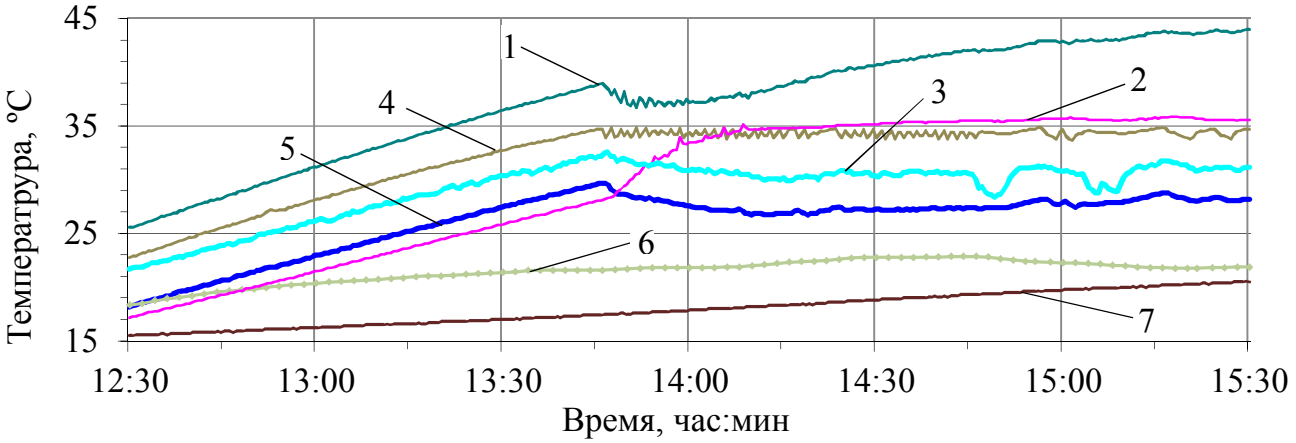

Рисунок 15 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТУ:
1 – температура воды в верхних слоях СК; 2 – температура воды в нижних слоях СК; 3 – температура по вертикали в центре абсорбера ФЭТМ; 4 – температура воды в верхних слоях ФЭТМ; 5 – температура воды в средних слоях ФЭТМ; 6 – температура окружающего воздуха; 7 – температура воды в напорном баке

Из рисунка 15 можно видеть, что температура на выходе СК (кривая 1) лишь постепенно увеличивается и, из-за низких теплотехнических и оптических характеристик материалов, используемых в его конструкции, а также существенной толщины бака, не достигает определённого неизменяющегося с течением времени значения, что также согласуется с теоретическими данными.

Представленные и описанные процессы функционирования ФЭТУ (рисунок 15) подтверждают эффективную работу в режиме, при котором установка и система автоматики не допускают перегрева ФЭ панели ФЭТМ в течение дня, тем самым поддерживая высокую выработку электроэнергии. Система автоматики и технологическая схема солнечной когенерационной установки обеспечивают заданную работу ФЭТМ. Слив жидкости осуществляется с заданной температурой (около 35 °С), отклонения незначительные (около 1 °С). Непредвиденных процессов, ухудшающих работу системы, в ходе экспериментальных исследований выявлено не

было. Полученные результаты подтверждают обоснованность практической реализации разработанной технологической схемы.

В четвёртой главе «Экономическая эффективность применения фотоэлектрической тепловой установки» выполнен технико-экономический расчёт солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ и СК. Для разработанной ФЭТУ преобладающей является выработка тепловой энергии, поэтому её характеристики находятся исходя из необходимости покрытия доли тепловой нагрузки. При этом временная неравномерность прихода СИ как суточная, так и сезонная, а также особенности ФЭТУ не позволяют гарантировать 100 % покрытия нагрузки. Исходя из чего доля покрытия тепловой нагрузки, согласно рекомендациям, принята равной 50 %.

Тепловая нагрузка ФЭТУ, определяемая потреблением горячей воды семьей из четырёх человек, имеющей личное подсобное хозяйство, равна 4080 кВт·ч/год. Вода, согласно принятой технологической схеме, нагревается в две стадии: на первой стадии за счёт ФЭТМ до 35 °С, на второй – за счёт СК до 60 °С.

Площади ФЭТМ и СК, обеспечивающие покрытие необходимой нагрузки объекта, определяются, как было отмечено выше, исходя из равенства объемов производства ими нагретой воды и равны 1,42 $м^2$ и 2,85 $м^2$, соответственно, а установленная мощность фотоэлектрической части ФЭТМ равна 150 Вт при КПД СЭ составляющем 14 %.

За год удельная выработка энергии ФЭТМ и СК определяется путем суммирования месячных значений выработки, найденных, в свою очередь, исходя из почасового расчёта производства энергии для каждого среднего дня месяца.

Общие показатели экономической эффективности использования ФЭТУ представлены в таблице 1. Показатели себестоимости электрической и тепловой энергии, приведённые в таблице 1, определены с учётом капиталовложений на соответствующие части установки, обеспечивающие производство электричества и тепла.

Таблица 1 – Общие показатели экономической эффективности ФЭТУ

Экономический показатель	г. Краснодар	Московская область
Суммарные дисконтированные затраты, руб.	63 851	91 931
Себестоимость электроэнергии с учётом капиталовложений на электрическую часть установки руб./кВт·ч	6,86	7,20
Себестоимость тепловой энергии с учётом капиталовложений на тепловую часть установки руб./кВт·ч	1,46	2,06

В свою очередь, себестоимости электрической и тепловой энергии, представленные в таблице 2, найдены с учётом капиталовложений на всю установку, исходя из соотношения цен на электрическую и тепловую энергию при традиционном производстве энергии (с использованием природного газа, дизельного топлива, электроэнергии, теплоцентрали). Таким образом, оценивается экономическая

эффективность работы ФЭТУ с одним из доступных в заданном районе традиционных источников энергии. Показатели экономической эффективности проекта при использовании ФЭТУ в качестве альтернативы таким источникам, как электрокотел и теплоцентраль, в условиях г. Краснодар и Московской области представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели экономической эффективности ФЭТУ, соответствующие рассматриваемым первичным источникам

Экономический показатель	г. Краснодар	Московская область
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих использованию электрической энергии		
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	22 929	9 365
Внутренняя норма доходности, %	15,1	11,5
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	10,6	13,5
Индекс доходности дисконтированных инвестиций, о.е.	1,36	1,10
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	1,85	2,55
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,91	2,62
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих тарифам теплоцентрали		
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	6 883	-
Внутренняя норма доходности, %	11,63	-
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	13,5	-
Индекс доходности дисконтированных инвестиций, о.е.	1,11	-
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	2,28	4,00
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,88	2,45

Установлено, что ФЭТУ экономически эффективна в южных районах России даже при использовании её совместно с теплоцентралью. Таким образом, жители, подключенные к централизованной теплосети, также могут начать экономить при использовании ФЭТУ. Основные экономические показатели эффективности установки при этом следующие: ЧДД = 6 883 руб.; $Т_{ок.д}$ = 13,5 лет; окупаемость (себестоимость установки) наступает при цене на электрическую энергию равной 2,28 руб./кВт·ч и тепловую – 1,88 руб./кВт·ч.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснована и разработана технологическая схема солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя, обеспечиваемой применением электромагнитного клапана и реле-регулятора, которая позволяет, в сравнении с установками с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя, повысить эффективность производства электроэнергии на 19 % за счёт снижения потребления электроэнергии на собственные нужды и поддержания постоянной температуры СЭ модуля в течение всего дня.

2. На основе анализа механизмов взаимодействия фотонов СИ различной спектральной фотонной плотности с материалом фотоэлемента (кремний) определено распределение солнечной энергии в фотоэлектрической панели, а также предложен подход прогнозирования параметров фотоэлементов в составе ФЭТМ.

3. Обоснованы оптимальные параметры ФЭТМ в соответствии с особенностями рабочей схемы установки, в том числе и при его работе с ТН. В частности обоснована толщина и высота резервуара ФЭТМ, которые должны составлять 10-20 мм и около 2000 мм соответственно.

4. Разработан технологический процесс фиксации СЭ к тепловому абсорберу, обеспечивающий плотный тепловой контакт. Экспериментально установлено, что при интенсивности СИ 1000 Вт/м^2, температуре окружающей среды около 27 ºС и температуре жидкости в диапазоне 30-55 ºС разность температур между поверхностью ФЭП и абсорбера не превышает 2 ºС.

5. Определены режимы эксплуатации ФЭТМ, работающего по разработанной схеме, которые обеспечивают возможность получения различного соотношения производимой тепловой и электрической энергии, в зависимости от требований потребителей.

6. Создана математическая модель ФЭТМ, позволяющая определять его потенциальную выработку для различных условий эксплуатации при работе в составе разработанной технологической схемы.

7. Разработан и изготовлен макет ФЭТМ и комплекс лабораторного оборудования для исследований его работы в натурных условиях. С помощью комплекса проведены экспериментальные исследования работы макета солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ с одновременным мониторингом метеопараметров.

8. Проведена экономическая оценка различных вариантов использования солнечной когенерационной установки, показавшая перспективность её применения. Для энергоснабжения частного дома с личным подсобным хозяйством в г. Краснодар при ценах на вырабатываемую энергию, соответствующих тарифам теплоцентрали, срок окупаемости ФЭТУ составил 13,5 лет, а при ценах, соответствующих использованию электрической энергии, – 10,6 лет.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

Публикации, рекомендованные перечнем ВАК:

1. Харченко В.В., Тихонов П.В., Майоров В.А. Измерение параметров гелиоустановок с фотопреобразователями // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. №6. С. 35-37.

2. Харченко В.В., Никитин Б.А., Тихонов П.В., Макаров А.Э. Теплоснабжение с использованием фотоэлектрических модулей // Техника в сельском хозяйстве. 2013. №5. С. 11-12.

3. Стребков Д.С., Никитин Б.А., Харченко В.В., Гусаров В.А., Тихонов П.В. Влияние температур в широком интервале значений на параметры солнечных элементов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. №4. С. 46-48.

4. Харченко В.В., Тихонов П.В. Комплекс мониторинга основных параметров гелиоустановок с фотопреобразователями // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №2. С. 32-36.

5. Стребков Д.С., Никитин Б.А., Харченко В.В., Гусаров В.А., Тихонов П.В. Оценка степени излучения искусственных источников света // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. №4. С. 18-20.

6. Kharchenko V.V., Nikitin V.A., Tikhonov P.V. Theoretical method of estimation and prediction of PV cells parameters // Альтернативная энергетика и экология. 2012. С. 74-78.

7. Харченко В.В., Тихонов П.В. Мониторинг интенсивности солнечного излучения при испытании фотоэлектрических модулей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. №2. С. 21-22.

Патенты:

8. Патент на изобретение № 2509268 РФ, МКП F24J 2/02, 2/42. Когенерационная фотоэлектрическая тепловая система / Д.С. Стребков, В.В. Харченко, П.В. Тихонов, А.В. Тихонов, Б.А. Никитин, А.О. Сычев. № 2012117482/06; заявл. 28.04.12; опубл. 10.03.14; Бюл. №7. С.9.

9. Патент на изобретение № 2482401 РФ, МКП F24J 2/54. Установка автоматического слежения приемной панели за солнцем / Б.А. Никитин, В.В. Харченко, П.В. Тихонов, А.В. Тихонов. № 2011121234/06; заявл. 26.05.11; опубл. 20.05.13; Бюл. №14. С.9.

10. Патент на полезную модель № 126436 РФ, МКП F24J 2/42, H01L 31/058. Фотоэлектрическая водогрейная установка / В.В. Харченко, П.В. Тихонов, А.В. Тихонов, Б.А. Никитин, И.И. Тюхов. № 2012117491/06; заявл. 28.04.12; опубл. 27.03.13; Бюл. №9. С.2.

Публикации в зарубежных изданиях:

11. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V., Gusarov V.A. Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions // Proceedings of 5th International Conference TAE 2013 Trends in Agricultural Engineering. Prague, Czech Republic, 2013. P. 309-313.

12. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V., Gusarov V.A. Investigation of experimental and equipment for studying solar cells and modules // Moldavian Journal of the Physical Sciences. 2013. V. 12. P. 72-77.

13. Strebkov D.S., Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V., Gusarov V.A. Determination of conformity of the spectra of artificial light sources of the spectrums of standard solar radiation // Moldavian Journal of the Physical Sciences. 2013. V. 12. P. 82-86.

14. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Estimation and forecasting of PV cells and modules parameters on the basis of the analysis of interaction of a sunlight with a solar cell material // Proceedings of 4th International Conference TAE 2010 Trends in Agricultural Engineering. Prague, Czech Republic, 2010. P. 307-310.

15. Харченко В.В., Тихонов П.В., Никитин Б.А. Системы энергоснабжения на основе тепловых насосов и оборудования для улавливания солнечной энергии // Перспективные направления альтернативной энергетики и энергосберегающие технологии: труды межд. научно-практ. конф. Чимкент, 2010. С. 167-172.

16. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P. Utmost efficiency coefficient of solar cells versus forbidden gap of used semiconductor // Adomavicius The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies. Kaunas, Lithuania, 2010. P. 289-294.

Публикации в других изданиях:

17. Тихонов П.В. Солнечная когенерационная установка на основе фотоэлектрического теплового модуля // Возобновляемые источники энергии: матер. VIII Всеросс. научн. молод. школы с межд. участ. М.: Университетская книга, 2012. С. 390-395.

18. Харченко В.В., Никитин Б.А., Тихонов П.В. Выбор параметров фотоэлектрического теплового модуля // Возобновляемая и малая энергетика 2012: сб. труд. IX межд. ежегод. конф. М., 2012. С. 292-297.

19. Харченко В.В., Тихонов П.В. Математическая модель фотоэлектрического теплового модуля, функционирующего в составе комбинированной системы на основе теплового насоса // Ж. Малая энергетика. 2011. №3-4. С. 50-56.

20. Тихонов П.В. Системы на основе фотоэлектрических тепловых модулей и теплового насоса // Альтернативный киловатт. 2010. №6. С. 34-36.

21. Тихонов П.В., Харченко В.В. Системы энергоснабжения на основе когенерационных фотоэлектрических и тепловых модулей и тепловых насосов // Труды 7-й межд. научно-технич. конф. Часть 4: Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. С. 275-279.

22. Никитин Б.А., Тихонов П.В., Харченко В.В. Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на выработку электричества и тепла в когенерационном фотоэлектрическом модуле // Труды 7-й межд. научно-технич. конф. Часть 4: Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. С. 159-164.

23. Харченко В.В., Тихонов П.В. Теплонасосные системы теплоснабжения с использованием ВИЭ // Ориентированные фундаментальные исследования – от современной науки к технике будущего: сб. научн. труд. М.: Эксподизайн-Холдинг, 2009. Электрон.опт. диск (CD-ROM).