ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
(ВИЭСХ)

На правах рукописи

Тихонов Павел Валентинович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО МОДУЛЯ

специальность 05.14.08 — энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Харченко В.В.

Москва – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4
1 Обзор основных типов и характеристик фотоэлектрических тепловых модулей и установок на их основе 9
1.1 Фотоэлектрическая тепловая установка 9
1.1.1 Фотоэлектрические модули 9
1.1.2 Солнечные тепловые коллекторы 10
1.1.3 Тенденции роста рынка солнечной энергетики и его долгосрочные перспективы 11
1.1.4 Фотоэлектрические тепловые модули и установки на их основе 13
1.1.5 Влияние температуры на характеристики фотоэлектрических тепловых модулей 15
1.1.6 Основные типы фотоэлектрических тепловых установок 17
1.2 Плоские жидкостные фотоэлектрические тепловые модули и установки на их основе 19
1.2.1 Типы установок на основе фотоэлектрических тепловых модулей 19
1.2.2 Технологическое развитие фотоэлектрических тепловых модулей и установок на их основе 21
1.2.3 Основные конструкции фотоэлектрических тепловых модулей и их теоретическая эффективность 25
1.2.4 Математические модели фотоэлектрических тепловых установок 30
1.3 Выбор направления исследования 33
2 Исследование фотоэлектрического теплового модуля и различных установок на его основе 34
2.1 Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на выработку электричества и тепла в когенерационном фотоэлектрическом тепловом модуле 34
2.2 Влияние температуры в широком интервале значений на параметр напряжения холостого хода солнечных элементов 40
2.3 Определение и обоснование рекомендуемых режимов работы фотоэлектрического теплового модуля в соответствии с требованиями потребителя 43
2.4 Обоснование и принцип работы схемы солнечной когенерационной установки 46
2.5 Математическое моделирование установки на основе ФЭТМ 51
2.5.1 Разработка математической модели 51
2.5.2 Результаты теоретического исследования разработанной модели 64

2.5.3 Обоснование толщины и высоты резервуара фотоэлектрического теплового модуля, работающего в составе разработанной технологической схемы 68
2.6 Механизм установки двухкоординатного слежения за положением солнца с одним электродвигателем 71
2.7 Использование ФЭТМ в составе комбинированной системы теплоснабжения на основе теплового насоса 75
2.8 Выводы по главе 80
3 Исследование экспериментального плоского фотоэлектрического теплового модуля 81
3.1 Конструкция экспериментального образца гелиоустановки на основе фотоэлектрического теплового модуля 81
3.2 Способ оценки производства электроэнергии фотоэлектрической панелью фотоэлектрического теплового модуля 84
3.3 Разработка комплекса мониторинга основных параметров гелиоустановок с фотопреобразователями 85
3.4 Описание натурных исследований экспериментального образца фотоэлектрического теплового модуля 89
3.5 Результаты натурных исследований экспериментального образца ФЭТМ 91
3.5.1 Вольт-амперная характеристика фотоэлектрической панели ФЭТМ 91
3.5.2 Анализ нагрева различных элементов ФЭТМ 93
3.5.3 Особенности продольного и поперечного расположения модуля 99
3.5.4 Работа ФЭТМ в составе гелиоустановки 103
3.6 Выводы по главе 110
4 Экономическая эффективность применения фотоэлектрической тепловой установки 111
4.1 Определение характеристик фотоэлектрической тепловой установки, необходимых для обеспечения заданной нагрузки 111
4.2 Общие положения по оценке экономической эффективности фотоэлектрической тепловой установки 116
4.3 Оценка экономической эффективности фотоэлектрической тепловой установки 118
4.4 Выводы по главе 126
Заключение 127
Список принятых сокращений и условных обозначений 129
Список литературы 130
Приложение А Показания напряжения холостого хода и тока короткого замыкания фотоэлектрической панели ФЭТМ 141
Приложение Б Справка о внедрении результатов диссертационного исследования 142

ВВЕДЕНИЕ

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 [1], 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) [2]. 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 счет 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 учетом 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. Проведенные исследования показывают, что толщина резервуара ФЭТМ является одним из важнейших параметров, и при выборе ее значения необходимо учитывать режимы работы и климатические особенности места эксплуатации.

4. Предложенная математическая модель ФЭТМ адекватно отражает происходящие в нем 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, четырех глав и заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста. Она содержит 69 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 144 наименований и 2 приложения.

1 ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТИПОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МОДУЛЕЙ И УСТАНОВОК НА ИХ ОСНОВЕ

1.1 Фотоэлектрическая тепловая установка

В малой энергетике традиционное использование солнечной энергии осуществляется по двум направлениям:

- выработка электрической энергии с помощью СЭ, скоммутированных в модули и батареи;
- выработка тепловой энергии с помощью гелионагревательных установок.

1.1.1 Фотоэлектрические модули

Фотоэлектрическим преобразователем называется устройство, преобразующее солнечный свет напрямую в электроэнергию на основе фотогальванического эффекта. Также распространено название солнечный элемент (англ., solar sell) или фотоэлемент.

Существуют различные типы ФЭП. Наибольшее распространение в фотоэлектрических установках наземного применения получили кремниевые ФЭП трех видов – на основе монокристаллического, поликристаллического и аморфного кремния. Большая часть всех модулей производится с использованием поли- и монокристаллического кремния. В настоящее время КПД коммерчески доступных ФЭМ из монокристаллического кремния составляют порядка 14-19 %, передовые модули достигают значения 21,5 % [3]. Для поликристаллического кремния эти значения равны 14-17 %, для аморфного кремния – около 5-8 %.

В солнечной энергетике одним из перспективных материалов для создания высокоэффективных ФЭМ является арсенид галлия (GaAs). Такие модули обладают высоким КПД (для однопереходных ФЭП около 28 % [4]), повышенной способностью к поглощению СИ, устойчивостью характеристик при высоких рабочих температурах и целым рядом других важных особенностей.

Среди тонкопленочных ФЭП следует выделить диселенид меди-индия ($CuInSe_2$). У этого материала чрезвычайно высока способность к поглощению СИ: до 99 % света поглощается в первом микроне этого материала, ширина запрещенной зоны данного полупроводника составляет 1,0 эВ [5].

Большой интерес вызывает также теллурид кадмия (CdTe). У этого материала ширина запрещенной зоны составляет 1,44 эВ и близка к оптимальной, он обладает высокой поглощающей способностью по отношению к СИ. Фотопреобразователи на основе CdTe имеют высокие значения КПД (10-16 %) [5].

Отдельно можно выделить ФЭП, использующие органические материалы. ФЭП на основе диоксида титана (TiO_2), покрытого органическим красителем, демонстрирует КПД около 11 % [5]. Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO_2.

Солнечные элементы составляют основу ФЭМ. В таком модуле СЭ соединены в зависимости от необходимых характеристик последовательно и/или параллельно в электрическую цепь на одной подложке. ФЭМ, объединенные с аккумуляторной батареей (АБ), инвертором и дополнительным оборудованием, образуют фотоэлектрическую установку (систему).

Преимущество СЭ обусловлено отсутствием подвижных частей, их высокой надежностью и стабильностью. Модульный тип конструкции позволяет создавать установки с различными уровнями напряжения и практически любой мощности.

ФЭМ и СЭ могут обладать разными техническими характеристиками, поэтому любая серийно выпускаемая продукция такого рода должна иметь паспортные (стандартизированные) данные. Паспортные характеристики СЭ и ФЭМ оцениваются при проведении стандартных испытаний, условия которых следующие: поток СИ, падающий перпендикулярно на рабочую поверхность ФЭП, составляет 1000 Вт/м^2, температура СЭ при этом должна поддерживаться на уровне 25 ºС [6]. При отмеченных условиях снимаются основные характеристики ФЭМ или СЭ: ток короткого замыкания ($I_{кз}$), напряжение холостого хода (U_{xx}), максимальная мощность (P_{max}), коэффициент заполнения (fill factor – FF), вольт-амперная характеристика (ВАХ).

1.1.2 Солнечные тепловые коллекторы

Солнечный коллектор (СК) представляет собой устройство, которое поглощает излучающую энергию солнца и преобразует ее в тепловую энергию среды (обычно вода или воздух), используемой для горячего водоснабжения или обогрева.

Существуют различные типы СК, среди которых следует отметить:

- плоские;
- вакуумные;
- с использованием концентраторов.

Возможно также классифицировать СК по типу рабочей среды (вода, воздух, гликоль и т.д.).

Широко распространённый жидкостный плоский СК представляет собой теплопоглощающую панель (абсорбер), в которой имеются каналы (трубки) для циркуляции теплоносителя. Над поглощающим СИ абсорбером (с некоторым зазором относительно него)

расположена прозрачная изоляция. Вся эта конструкция помещена в корпус, нижняя и боковая части которого оснащены теплоизоляционным материалом.

Принцип действия такого СК основан на свойстве стекла пропускать коротковолновые солнечные лучи и задерживать длинноволновую радиацию нагретой поверхности (абсорбера) – явление, которое называется "парниковым эффектом". В результате такого селективного пропускания солнечная радиация поглощается панелью абсорбера, которая, нагреваясь, начинает испускать длинноволновое излучение. И, благодаря способности стекла задерживать длинноволновое излучение, происходит значительное повышение температуры внутри ограниченного стеклом пространства. Улучшить пропускающие свойства стекла помогают текстурированная поверхность и снижение в составе материала железа, а задерживать длинноволновое излучение помогают дополнительно наносимые селективные покрытия. Уменьшить тепловые потери позволяет также многослойное светопрозрачное покрытие коллектора.

Обычно панель абсорбера изготавливается из материала с высокой теплопроводностью (медь, алюминий) и окрашивается или покрывается материалом черного цвета, который обладает высоким коэффициентом поглощения солнечной энергии.

Современные плоские СК обладают следующими преимуществами: высокая эффективность при относительно невысокой стоимости, надежность, относительная простота конструкции, длительный срок эксплуатации.

1.1.3 Тенденции роста рынка солнечной энергетики и его долгосрочные перспективы

Солнечная энергетика является одной из самых перспективных отраслей возобновляемой энергетики. Она обладает колоссальным энергетическим потенциалом, который превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и других энергетических ресурсов. Развитию данной отрасли также способствуют различные программы, реализуемые в США, Японии, Китае, странах Европы.

Мировой рынок солнечного фотоэлектричества на протяжении более 10 лет характеризовался стремительным ростом. Консолидированная мощность фотоэлектрических систем увеличилась с 0,1 ГВт в 1992 году до 40 ГВт в 2010 году [7]. Такой рост связан в основном с существенным сокращением издержек и цен, что, в свою очередь, обусловлено увеличением масштаба производства, улучшением технологии и повышением эффективности солнечных батарей. Компания Solarbuzz, осуществляющая прогноз развития рынка в этой отрасли, предсказывает развитие мирового рынка фотоэлектричества в районе 46,3 – 96,8 млрд. долларов в 2014 году [8]. Исходя из различных сценариев развития предполагается, что в 2014

году спрос мощности достигнет 49 ГВт, это более чем в шесть раз превышает показатели 2009 года [9].

На мировом рынке СК, также как и на рынке фотоэлектричества, наблюдается рост производства. Мировым лидером по производству и применению СК является Китай. Широкое развитие гелиоводонагреватели получили в Израиле, где законодательно предусматривается строительство жилых зданий оснащенных солнечными водонагревательными установками. Согласно данным BCC Research мировой рынок технологий в области гелионагревательных установок в жилищном и торговом сегменте оценивался в 8 млрд. долларов в 2009 году, но к 2014 году ожидается рост почти до 20 млрд, а совокупные темпы роста (англ., Compound Annual Growth Rate) за пять лет составят 19,8 % [10]. Самый большой сегмент рынка занимают установки для нагрева воды. По оценкам BBC финансовые потоки в этот сегмент в 2009 году составили 7,9 млрд долларов, и в дальнейшем также прогнозируется их рост на 19,9 % до 19,6 млрд в 2014 году.

Солнечная энергетика с учетом потенциала своего развития является источником энергии будущего, поэтому, несомненно, объемы развития ее рынка будут только расти (рисунок 1.1 [11]).

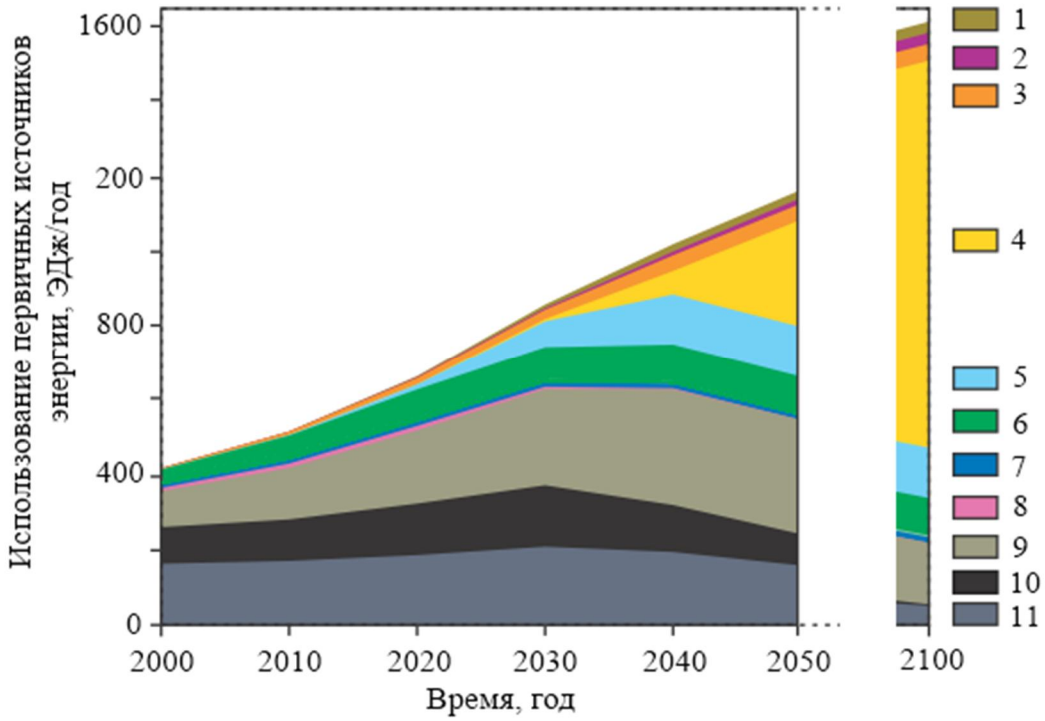


Рисунок 1.1 – Оценка производимой и прогнозируемой энергии первичных источников в мире до 2100 г.: 1 – энергия от геотермальных источников; 2 – энергия от других возобновляемых источников; 3 – тепловая энергия от СИ; 4 – электроэнергия от СИ; 5 – электроэнергия от ветра; 6 – энергия от биомассы; 7 – энергия от ГЭС; 8 – энергия от АЭС; 9 – энергия от газа; 10 – энергия от угля; 11 – энергия от нефтепродуктов

Системы на основе ФЭМ уже сегодня полностью конкурентоспособны среди систем электроснабжения в Европейском союзе и с каждым годом становятся всё более важной частью энергетического баланса по всему миру [12]. Системы на основе СК при грамотном выборе места эксплуатации рентабельны и окупаемы в течение относительно небольшого периода. В соответствии с результатами расчетов Тарнижевского Б.В. [13, 14], удельная годовая теплопроизводительность установок солнечного горячего водоснабжения в климатических условиях России достаточно высока и составляет 500 – 750 кВт·ч на 1 м^2 коллектора при коэффициенте замещения нагрузки (доли солнечной энергии в покрытии общей тепловой нагрузки) 0,4 – 0,6. Для сезонного (в неотопительный период) солнечного горячего водоснабжения коэффициент замещения нагрузки повышается до 0,6 – 0,8.

Распространено ошибочное мнение, что в нашей стране для развития солнечной энергетики нет достаточных ресурсов. Однако, в некоторых наших регионах (Северный Кавказ, Астраханская область, Калмыкия, Тува, Бурятия, Читинская область и Дальний Восток) среднегодовые показатели по приходу СИ не ниже, чем в Германии, которая является одним из мировых лидеров в области солнечной энергетики.

1.1.4 Фотоэлектрические тепловые модули и установки на их основе

Перспективы и преимущества ФЭМ и СК, а также поиск путей снижения себестоимости, привели к интеграции фотоэлектрических преобразователей в плоские СК и созданию на их основе нового вида установок, так называемых когенерационных фотоэлектрических тепловых модулей (англ., photovoltaic thermal modules) (рисунок 1.2).

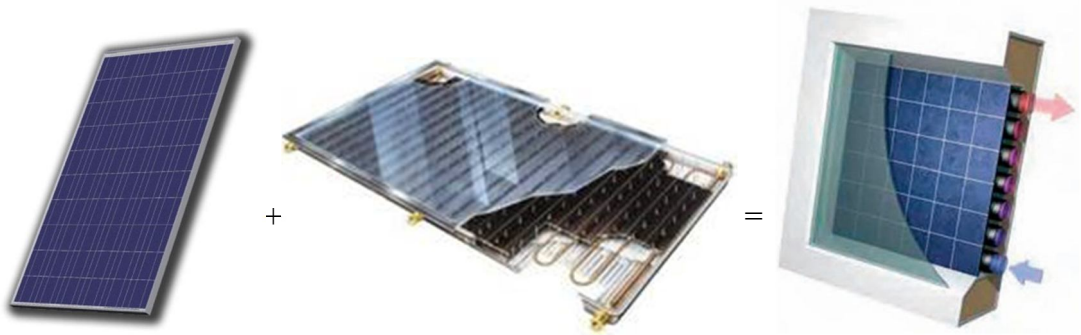


Рисунок 1.2 – ФЭТ технология (англ., photovoltaic thermal technologies)

ФЭТМ (рисунок 1.3 а), как правило, состоит из ФЭ панели, на тыльной стороне которой расположена пластина трубчатого абсорбера – устройства, поглощающего и отводящего тепло. ФЭ панель с различной эффективностью, в зависимости от типа используемого ФЭП, преобразует СИ в электроэнергию, остальная энергия потенциально преобразовывается в тепло. Абсорбер в данной конструкции выполняет двойную функцию. Во-первых, он охлаждает ФЭ

панель, отводя излишнюю энергию, не участвующую в генерации электричества, и тем самым повышая ее эффективность, во-вторых, производит тепловую энергию.

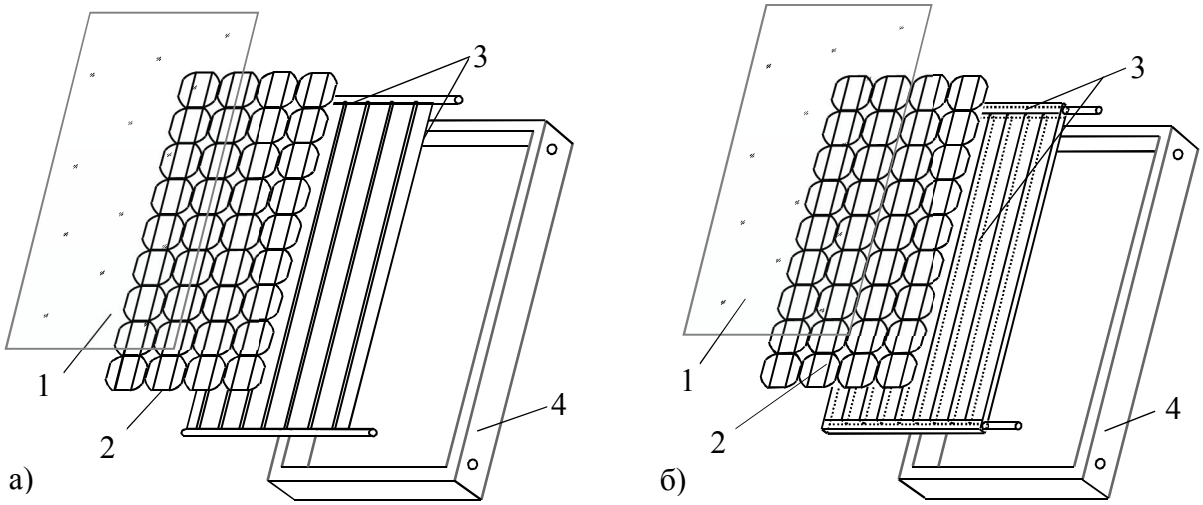


Рисунок 1.3 – Наиболее распространённые конструкции солнечного когенерационного модуля: а) с тепловым абсорбером “лист-труба”; б) с тепловым абсорбером из вертикальных прямоугольных каналов; 1 – прозрачная изоляция (остекление); 2 – ФЭ панель (батарея СЭ); 3 – тепловой поглощающий элемент (абсорбер); 4 – теплоизоляционный корпус

Таким образом, гибридные ФЭТМ – это устройства, которые одновременно выполняют преобразование солнечной энергии в электричество и тепло.

Широкое распространение конструкция с тепловым абсорбером “лист-труба” (см. рисунок 1.3 а) получила у производителей, специализирующихся на выпуске традиционных СК, поэтому их еще и называют фотоэлектрическими тепловыми коллекторами. Распространена также конструкция с абсорбером, представляющим прямоугольный резервуар с параллельными вертикальными каналами в поперечном разрезе (рисунок 1.3 б).

ФЭТМ, объединенный с баком аккумулятором, АБ, инвертором и вспомогательным оборудованием, представляет собой солнечную когенерационную установку (систему) (рисунок 1.4).

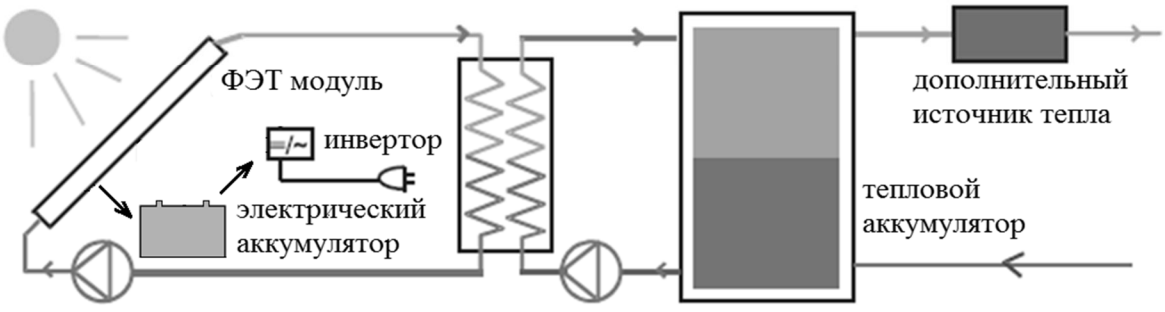


Рисунок 1.4 – Схема гелиоустановки с использованием ФЭТМ

Потребитель, имея такую установку, получает одновременно электрическую и тепловую энергию и, соответственно, возможность автономного энергообеспечения.

1.1.5 Влияние температуры на характеристики фотоэлектрических тепловых модулей

Современные технологии преобразования СИ на данный момент таковы, что только незначительная часть его может быть использована в фотопреобразователях для выработки электрической энергии. Бóльшая же часть солнечной радиации преобразуется в элементах ФЭМ в тепло. Это приводит к повышенной рабочей температуре ФЭП, которые могут нагреваться до температур существенно выше окружающей среды, что ведет к снижению эффективности ФЭП. В ряде работ влияние температурного фактора на эффективность ФЭП оценивается в виде линейной зависимости с отрицательным коэффициентом наклона [15, 16, 17].

На рисунке 1.5 [17] представлены обобщенные температурные зависимости напряжения холостого хода U_{XX}, плотности тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ и максимальной мощности P_{max} кремниевых кристаллических ФЭП в диапазоне температур от -5 до 75 °С. Из анализа представленных данных следует, что характер изменения этих параметров близок к линейному. При этом коэффициент наклона для U_{XX} является отрицательным и составляет величину около -0,4 %/°С, для P_{max} этот коэффициент также отрицателен, но имеет несколько большую модульную величину (-0,5 %/°С). Изменение тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ с ростом температуры также носит характер близкий к линейному, но с весьма малым положительным коэффициентом наклона (порядка 0,06 %/°С). Как видно из рисунков 1.5 и 1.6 основным фактором, снижающим вырабатываемую мощность, является U_{XX}.

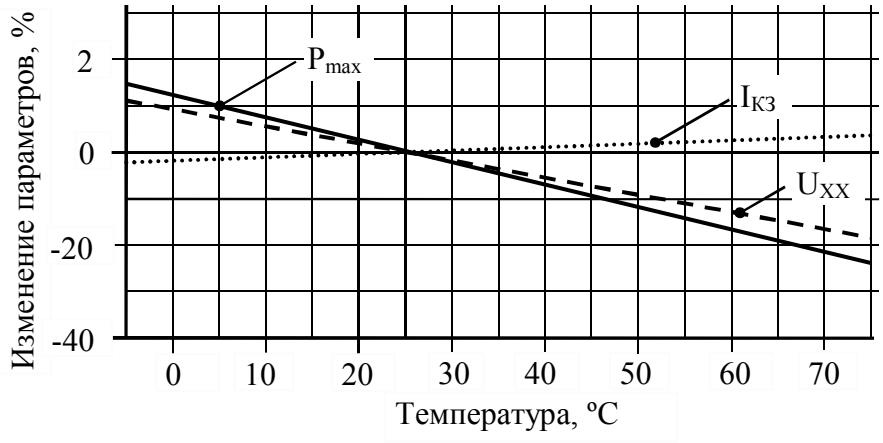


Рисунок 1.5 – Экспериментальные зависимости изменения параметров ФЭП от температуры

Различные типы фотопреобразователей имеют разные зависимости характеристик от температуры. Так, для элементов на основе аморфного кремния выходные характеристики

демонстрируют меньшую зависимость от температуры по сравнению с ФЭП на основе кристаллического кремния. Арсенид-галлиевые (GaAs) элементы сохраняют свою эффективную работу при высоких рабочих температурах (до 150 ºС) [18]. Тонкопленочные сульфидно-кадмиевые ФЭП сохраняют высокую эффективность вплоть до температуры 100 °С [18]. В паспортах выпускаемых современных ФЭП всегда указываются зависимости основных технических характеристик от их рабочей температуры.

Соответственно, вследствие различной зависимости характеристик ФЭП от температуры, при конструировании и выборе режима работы важно учитывать, как изменяются параметры фотоэлектрической части ФЭТМ.

Зависимость эффективности фотоэлементов от температуры при переменных погодных и эксплуатационных условиях проанализирована в работах Скоплаки и Палывоса [19; 20].

Тепловая эффективность плоских ФЭТМ, также как и СК, существенно зависит от температуры производимого ими теплоносителя. При высоких температурах теплоносителя КПД модуля ниже, чем при низких. Такая закономерность связана с ростом теплового потока между коллектором и окружающей средой при возрастании температурного градиента. Эти особенности необходимо учитывать при выборе режимов эксплуатации модулей.

Из сказанного выше ясно, что чем ниже температура теплоносителя в ФЭТМ, тем выше эффективность выработки как тепловой, так и электрической энергии. Поэтому рабочая температура теплоносителя должна быть невысокой. В работах Фраисса и др. [21] также отмечалась целесообразность работы установки с низкой температурой теплоносителя на выходе.

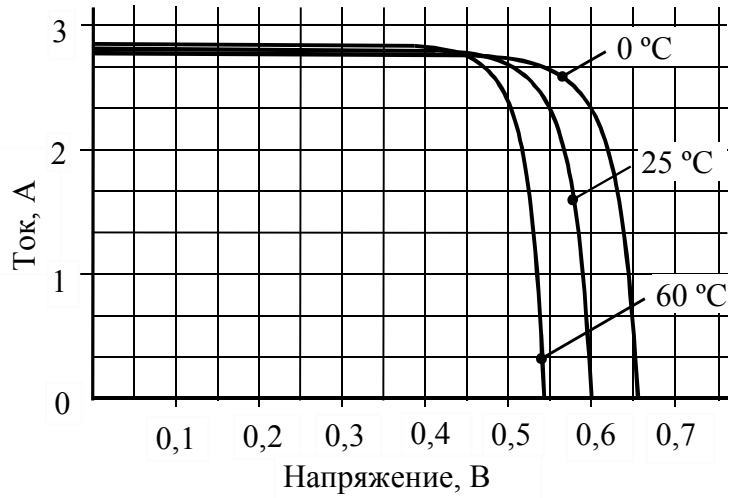


Рисунок 1.6 – Влияние температуры на ВАХ кремниевого ФЭП

Наиболее оправданным и перспективным представляется применение ФЭТМ в системах многоступенчатого нагрева теплоносителя, т.е. их использование для нагрева теплоносителя до низкой температуры (30 – 40 ºС) и дальнейший его нагрев до требуемой температуры в других

установках (СК, тепловой насос). Соответственно, в таком случае данный режим работы ФЭТМ ведет к повышению эффективности всей комбинированной системы энергоснабжения.

1.1.6 Основные типы фотоэлектрических тепловых установок

Фотоэлектрические тепловые установки (ФЭТУ) могут быть классифицированы по ряду различных признаков, таких как: тип используемой ФЭ панели (на аморфном кремнии, кристаллическом кремнии, пленках), остекленный или не остекленный модуль, тип теплоносителя (вода/гликоль или воздух), наличие концентратора и т.д. В свою очередь, с учетом конструкции установок можно выделить пять групп:

- установки на основе плоских жидкостных ФЭТМ;
- установки на основе плоских воздушных ФЭТМ;
- ФЭТ фасады зданий;
- ФЭТУ с концентратором;
- установки на основе теплового насоса и плоских ФЭТМ.

Жидкостные ФЭТМ обычно создаются на основе какого-либо коммерчески доступного СК, который дополняется СЭ, размещаемыми на поверхности поглотителя. Несколько фирм уже разработали и реализуют свою продукцию на рынке. Например фирма Millennium Electric с 1991 года выпускает подобные модули [22]. Для коммерческой реализации представлен целый ряд модулей (мощностью от 190 до 340 Вт), одним из их последних продуктов является модуль MIL-PVT-M03-340Watt Data Sheet, осуществляющий не только выработку электричества и нагрев воды, но и нагрев воздуха. В основу его конструкции положен трубчатый коллектор, на абсорбере которого размещены СЭ, соединенные в батарею. Жидкостные ФЭТМ производит также в Китае фирма Helios Photovoltaic Co., Ltd. [23]. Она предлагает целый модельный ряд EL-PVT модулей. В Германии фирмой Res - regenerative energietechnik und - systeme GmbH выпускаются два типа модулей. Такие компании как Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. (Китай) [24], Solimpeks Solar Energy Corp. (Турция) [25], NES Ltd. (Болгария) [26], SIA ALTENERGO (Латвия) [27] и т.д. в номенклатуре производимой ими продукции также имеют ФЭТ модули.

Наибольшее использование на данный момент получили ФЭТУ, используемые для нагрева воздуха. Связанно это с тем, что в них зачастую используются стандартные ФЭМ, практически не требующие доработок. Соответственно, существует достаточно большое количество фирм, производящих воздушные ФЭТМ и ФЭТ фасады зданий, основные из которых: Millennium Electric (Израиль), Aidt Miljø A/S (Дания), Conserval Engineerin (Канада), Grammer K (Германия) [28]. Воздушные ФЭТМ подобны обычным воздушным коллекторам,

дополненным ламинированными ФЭМ, которые в данной конструкции являются также поглотителем и верхним покрытием воздушного канала коллектора. Обычно ФЭТ фасады представляют собой размещенные на фасадах или крышах зданий фотоэлектрические модули, за тыльной стороной которых предусмотрено пространство, по которому за счет естественной конвекции или принудительной циркуляции движутся потоки воздуха, охлаждая ФЭП. Некоторые ФЭТ фасады зданий были реализованы в конкретных проектах, таких, как крыша студии Imagina в Барселоне (2004, TFM) и профессиональный тренировочный центр в Casargo (2005, Secco Sistemi) [28].

ФЭТ концентраторы представляют также интерес, поскольку оптические концентраторы за счет использования концентрированного СИ позволяют сократить дорогостоящие ФЭП отражательными элементами и при этом повысить их эффективность. Это является важным преимуществом на пути к снижению себестоимости производимой энергии. При этом появляются и недостатки, связанные с необходимостью использования дополнительного оборудования и квалифицированного обслуживания всей установки.

Разработками ФЭТУ с концентраторами занимается множество фирм по всему миру, некоторые разработки получили коммерческое развитие. В Великобритании фирма Helio Dynamics наладила коммерческий выпуск серии ФЭТУ с концентраторами и системой слежения [29]. Канадская компания Menova Engineering Inc. также создала ФЭТУ с концентратором с целью ее коммерческой реализации. Шведская фирма Absolicon реализовала свой двадцатилетний опыт в коммерческой установке Absolicon X10 PVT [30].

В Российской Федерации также имеются разработки ФЭТУ с концентраторами. В ВИЭСХе разработан целый ряд установок со стационарным концентратором [31, 32]. В Государственном унитарном предприятии «НПО Астрофизика» созданы установки: ГЭУ-250; СФЭУ-1 [33]. Во ФГУП ВЭИ им. Ленина велись разработки и исследования гибридной установки с концентратором СИ [34; 35].

Перспективным направлением в ФЭТ технологиях является использование их с теплонасосными установками (ТНУ). В соответствии с классификацией, предложенной в [36], можно выделить два основных направления развития ФЭТУ совместно с тепловыми насосами (ТН). В первом используются комбинации на основе традиционного ТН и ФЭТМ. Во втором используются ФЭТУ, в которых в пространстве под фотоэлементами непосредственно располагается испаритель ТН [37]. Таким образом, в данной конструкции элементы ФЭТМ и ТН взаимно интегрированы и представляют собой одно технологическое оборудование на основе ТНУ. Каждый интегрированный объект такой системы является неотъемлемой его частью, и работа его отдельно от системы невозможна. Такая система сочетает в себе все

преимущества первого варианта системы на основе ТНУ, позволяет снизить габариты и материалоемкость, и, главное, повысить ее эффективность.

Отдельно можно выделить тип классификации, показывающий наличие застекления в ФЭТУ. В некоторых установках применяются светопрозрачные покрытия, размещённые над поглотителем с зазором относительно него, для того, чтобы существенно уменьшить тепловые потери и повысить тем самым тепловой КПД ФЭТМ. Если такое покрытие присутствует, модуль называется "застеклённый" (англ., glazed). В случае, если имеется защитное прозрачное покрытие (в основном различные полимерные плёнки, иногда стекло) без зазора, то модуль называется "незастёкленный" (англ., unglazed). В этом варианте повышается электрический КПД ФЭТМ за счет повышения теплового потока в окружающую среду через светопрозрачное покрытие.

У незастекленного модуля есть свои преимущества и недостатки по сравнению с застекленным и, соответственно, наоборот. Поэтому при решении вопроса, должен ли модуль быть застекленным или нет, важно найти подходящий баланс между увеличением количества вырабатываемой тепловой энергии, уменьшением количества вырабатываемой электрической энергии, а также учесть дополнительные факторы и проблемы, которые при этом возникают.

1.2 Плоские жидкостные фотоэлектрические тепловые модули и установки на их основе

1.2.1 Типы установок на основе фотоэлектрических тепловых модулей

Системы энергоснабжения коммунально-бытового назначения на основе ФЭТМ по способу циркуляции теплоносителя можно разделить на две группы:

- гелиосистема с естественной циркуляцией теплоносителя;
- гелиосистема с принудительной циркуляцией теплоносителя.

В гелиосистемах с естественной циркуляцией теплоносителя используется принцип термосифонного эффекта. При нагреве теплоносителя его плотность уменьшается, поэтому нагретые слои жидкости переносятся в верхнюю часть коллектора, в результате чего возникает разность давлений, и, если контур замкнут, образуется естественная циркуляция теплоносителя в данном контуре. Соответственно в такой системе накопительный бак необходимо устанавливать выше фотоэлектрического теплового модуля (рисунки 1.7 а и 1.7 б). Скорость циркуляции теплоносителя в основном зависит от конструкции коллектора, интенсивности СИ и скорости охлаждения в теплообменнике (в двухконтурных системах). Установки такого типа обладают простотой и относительно невысокой стоимостью. К недостаткам термосифонных

систем следует отнести их низкую тепловую эффективность по сравнению с системами с принудительной циркуляцией теплоносителя. В системах с принудительной циркуляцией, движение теплоносителя осуществляется за счет работы насоса, поэтому накопительный бак в системе можно уже устанавливать в любом удобном месте (рисунки 1.7 в и 1.7 г). Работой насоса управляет контроллер, а потребляемая мощность насоса намного меньше мощности вырабатываемой электрической и тепловой энергии. Электроснабжение элементов установки (контроллеры, циркуляционные насосы) осуществляется от фотоэлектрических панелей, обеспечивая тем самым бесперебойное и автономное питание. К недостаткам систем с принудительной циркуляцией теплоносителя можно отнести более высокую стоимость и меньшую надежность по сравнению с выше описанной установкой.

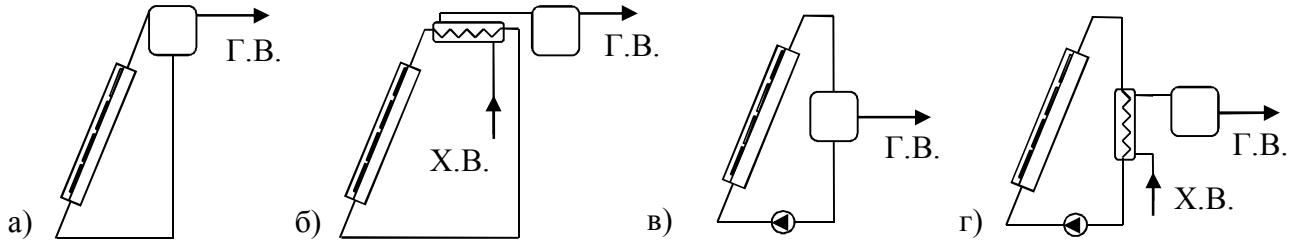


Рисунок 1.7 – Принципиальные схемы установок солнечного горячего водоснабжения на основе ФЭТМ: а) – одноконтурные с естественной циркуляцией б) – двухконтурные с естественной циркуляцией в) – одноконтурные с принудительной циркуляцией г) – двухконтурные с принудительной циркуляцией

Однако, в бытовых термосифонных установках и в некоторых установках с принудительной циркуляцией вместе с несекционным баком-аккумулятором невысокой емкости, рассчитанной на нагрев воды в течение дня, стоит отметить особенность, существенно снижающую эффективность установки. Она заключается в том, что в солнечный день при нагреве теплоносителя в течение дня нагреваются и нижние слои жидкости бака-аккумулятора, которые в процессе работы направляются к ФЭТМ, тем самым увеличивается средняя температура ФЭ панели модуля и ухудшаются ее характеристики. Имеются системы, лишенные отмеченного выше недостатка, но при этом они становятся более сложными и дорогими.

ФЭТУ также можно классифицировать по количеству контуров теплоносителя:

- одноконтурные;
- двух- и многоконтурные.

В одноконтурных системах жидкость циркулирует через ФЭТМ и тепловой аккумулятор, и затем используется потребителем (см. рисунки 1.7 а и 1.7 в). Преимущества данной установки заключаются в простоте и достигаемой высокой эффективности (в сравнении с двухконтурными), недостатки – в высоких требованиях к жидкости. Она должна обладать

следующими характеристиками: чистота, определенная жесткость, определенное содержание газов и солей. Одноконтурные установки популярны при сезонном использовании в регионах с положительными температурами.

В двухконтурных системах в первом контуре, связанном непосредственно с гелиоустановкой, используется или специальный теплоноситель, или специально подготовленная вода (см. рисунки 1.7 б и 1.7 г). Тепловая энергия при работе такой установки передается от теплоносителя первого контура к теплоносителю второго контура, в качестве которого уже применяется вода, используемая в хозяйственно-бытовых целях. Преимущества заключаются в длительном эксплуатационном сроке, в возможности работы установки при отрицательных температурах; недостатки – в меньшей эффективности и необходимости замены теплоносителя первого контура через несколько лет.

1.2.2 Технологическое развитие фотоэлектрических тепловых модулей и установок на их основе

Первые теоретические и экспериментальные исследования ФЭТУ были проведены в 1970 г. В своей работе Вольф [38], используя данные метеобюро Бостона, произвел почасовые расчеты баланса энергии между тепловыми потерями здания и выработкой солнечной установки. Солнечная когенерационная установка представляла собой солнечный плоский коллектор с размещённой на его абсорбере фотоэлектрической панелью. Анализ показал, что ФЭТУ представляет собой перспективное направление и необходимы дальнейшие исследования, в частности, требовалась реализация методов температурного контроля.

Разработки и исследования в этом направлении продолжали Керн, Русселл [39] и Хендрие [40] – используя ФЭТУ, производящие горячую воду и воздух, они определили ключевые понятия и основные приоритеты развития ФЭТ систем.

В течение приблизительно десяти лет, начиная с конца 1980 г., Гарг и его сотрудники выполнили аналитические и экспериментальные исследования воздушных и жидкостных ФЭТ систем. В работе [41] Гарг и Агарвал исследовали ФЭТМ с принудительной циркуляцией теплоносителя. В частности, они проводили работы по оптимизации режимов работы циркуляционного электронасоса. Также авторами в работе [42] исследовано влияние некоторых параметров конструкции термосифонной ФЭТУ на ее эффективность в течение дня. Отмечено, что средняя эффективность СЭ несущественно зависит от площади занимаемой ФЭП на поглощающей СИ поверхности модуля. Однако, тепловой КПД существенно зависит от данного фактора. Параметром, влияющим на работу установок, также является количество

воды в баке-аккумуляторе термосифонной системы. В работе [43] при натурных испытаниях исследована термосифонная ФЭТУ с использованием параболического концентратора.

Пракаш [44] выполнил анализ переходных процессов, возникающих при работе плоских ФЭТ коллекторов, разработанных для нагревания воздуха и воды. Эффективность нагрева воздуха в результате недостаточной теплопередачи между плоским абсорбером и потоком воздуха была существенно ниже эффективности коллектора, нагревающего воду.

Бергене и Ловвик исследовали влияние соотношения ширины ребра к диаметру трубы в тепловом абсорбере ФЭТУ [45]. Установка работала с общим КПД в интервале 60-80 % и была использована для подогрева воды в системе горячего водоснабжения.

Вриес [46] в Нидерландах исследовал стационарные ФЭТ коллектора различных конфигураций, проводя исследования конструкций с различным количеством светопрозрачных поверхностей (одинарное, двойное, без застекления). Наилучшие результаты показали конфигурации ФЭТМ с одинарным остеклением. Однако, эксергетический анализ, выполненный Фуйисавой и Тани [47], показал, что эксергетическая плотность выхода открытой конструкции немного выше, чем конструкции с одинарным покрытием.

В работе [48] приведены результаты работы ФЭТУ в зимний период времени с использованием в контуре незамерзающей жидкости (антифриза). Установлено, что при эксплуатации ФЭТУ круглогодично на антифризе, в летний теплый период времени будет наблюдаться несущественное снижение эффективности.

Экспериментальные исследования ФЭТ системы в г. Эр-Рияд (Саудовская Аравия) показали, что высокая температура окружающей среды приводит к 30%-ому понижению фотоэлектрической эффективности, хотя тепловой КПД остается высоким [49]. В работе [50] также отмечается существенное снижение показателей эффективности (вплоть до 40 %) традиционных ФЭМ при эксплуатации в условиях жаркого климата, а также рассматриваются пути повышения эффективности ФЭП. Стоит отметить, что в некоторых режимах работы ФЭТУ не наблюдается снижения эффективности их ФЭП в летний период времени (в условиях высоких температур окружающей среды).

Важно также понимать, что если в летний период времени эффективность ФЭТУ может быть выше эффективности ФЭМ, то в зимний период наблюдается обратная ситуация – эффективность ФЭТУ становиться ниже эффективности традиционных ФЭМ. Соответственно, на эффективную работу ФЭТУ будут существенно влиять климатические условия в месте эксплуатации.

Калогироу [51], используя программу TRNSYS, смоделировал ФЭТ систему бытового назначения с циркуляционным насосом, регулируемым по расходу жидкости, состоящую из водяного бака, АБ, инвертора и температурного дифференциального контролера. Позже

Калогироу совместно с Трипанагностопоулосом [52] исследовали более подробно ФЭТУ бытового назначения, работающую на термосифонном принципе и с использованием принудительной циркуляции теплоносителя. Их имитационное моделирование рассматривало 12 различных вариантов установки с двумя типами ФЭ панелей pc-Si и a-Si в трех городах: Никосии (в 35°N) на Кипре, Афинах (в 38°N) в Греции и Мэдисоне (в 43°N) в США. Модули на a-Si имели преимущество вследствие своих более низких начальных затрат. Оказалось экономически выгоднее всего использовать данные установки в Никосии и Афинах.

Санднес и Рекстад [53] исследовали работу остеклённого и неостеклённого ФЭТ коллектора, в котором СЭ были приклеены к его полимерному тепловому абсорберу. Прямоугольные каналы абсорбера были заполнены керамическими гранулами для улучшения теплопередачи. Основное применение такого коллектора заключается в использовании его для низкотемпературных систем нагрева воды.

В работе [54] Захарченко с соавторами также определяли важность наличия хорошего теплопроводящего контакта между СЭ и тепловым абсорбером. Они отмечали, что коммерческий ФЭМ не должен непосредственно использоваться в конструкции ФЭТ установок. Ими был исследован специальный электроизоляционный материал толщиной 2 мкм, наносимый на алюминиевый лист (тепловой абсорбер) толщиной 2 мм для крепления СЭ. Общая теплопроводность такого слоя оказалось на 15 % меньше, чем алюминия. Теплопроводность самого электроизоляционного скрепляющего вещества составила 1,4 Вт/м·К. В их работе также показано, что площадь ФЭ панели должна быть меньше, чем площадь абсорбера, и СЭ должны быть расположены преимущественно около той части ФЭТМ, где осуществляется залив теплоносителя.

В Нью-Дели (Индия) Дубеу и Тивари [55] исследовали рабочие характеристики ФЭТУ с одинарным остеклением и частичным покрытием поверхности теплового абсорбера СЭ (коэффициент отношения эффективной площади СЭ ко всей рабочей поверхности ФЭТ коллектора был равен 0,25). Электричество, произведенное от ФЭ панели, расположенной около места подвода теплоносителя к ФЭТ коллектору, использовалось для электроснабжения циркуляционного насоса. Математическая модель установки на основе частично покрытого СЭ ФЭТ коллектора и последовательно соединенного с ним СК показала, что могут быть достигнуты высокие показатели тепловой и фотоэлектрической эффективности.

В работах [56, 57, 58] авторами было исследовано функционирование ФЭТМ с конструкцией абсорбера в виде канала. Ими экспериментально было установлено, что расстояние между тыльной стороной теплового абсорбера и противоположной металлической поверхностью коллектора (толщина канала с жидкостью) должна быть около 5-7 мм в установках с принудительной циркуляцией теплоносителя и параметрами рабочей поверхности

390×450 мм. Также была показана высокая эффективность ФЭТМ по сравнению с ФЭМ в условиях жаркого климата, даже при отсутствии теплоизоляции дна приемника.

Саитохи и соавторы [59] в Японии изучили экспериментальные характеристики ФЭТ коллектора с одинарным остеклением и с абсорбером типа «лист-труба», в котором в качестве теплоносителя использовался пропиленгликоль. При постоянной температуре и уровне расхода теплоносителя эффективность элементов находилась в диапазоне 10-13 %, а эффективность коллектора 40-50 %. Было отмечено, что общая эффективность ФЭТ коллектора эквивалентна эффективности СК, а общая эксергетическая эффективность выше, чем эффективность отдельного ФЭМ или СК.

В Гонконге Чоу с соавторами [60] выполнили натурные исследования двух идентичных термосифонных застеклённых и незастеклённых ФЭТУ типа «лист-труба». По результатам численного моделирования и экспериментов они определили некоторое преимущество установки с застеклёнными модулями, когда необходимо получить максимально высокие показатели выработки тепловой и электрической энергии. Однако, эксергетический анализ указывал на преимущество неостекленной конструкции в случаях, когда необходимо увеличить эффективность ФЭП. Стоит выделить также исследование [61] в котором, используя аналитическое моделирование, были рассчитаны ежегодные характеристики интегрированной в здание ФЭТУ, эксплуатируемой с учетом климата Гонконга. В результате ежегодная тепловая и электрическая эффективность составили около 37,5 % и 9,39 %, соответственно. Вырабатываемое установкой тепло использовалось для предварительного нагрева воды в системе горячего водоснабжения здания. Результаты показали целесообразность эксплуатации ФЭТУ, период окупаемости составил около 14 лет. Отмечалось также, что эффективная площадь ФЭ панели, масса воды в коллекторе и скорость ветра являются факторами, оказывающими существенное воздействие на эффективную работу ФЭТМ [62,63].

Дубеу и Тивари произвели эксергетический анализ ФЭТ коллектора типа лист-труба, оценили выработку его тепловой и электрической энергии, варьируя количеством используемых модулей и схемой их подключения (последовательно/параллельно) для различных климатических условий, соответствующих пяти городам Индии [64]. В одной из их работ был проведен эксергетический и экономический анализ параметров установки при постоянной скорости расхода и температуре производимой жидкости [65].

В Севастопольском институте созданы и исследованы экспериментальные установки с различными тепловыми абсорберами ФЭТМ, нагревающими совместно воду и воздух. Также была изучена работа этих ФЭТМ совместно с концентраторами, обладающими небольшим коэффициентом концентрации [66, 67].

В своей работе Зондаг с колегами [68] оценили степень влияния различных потерь на работу ФЭТМ. Также они оценили зависимость коэффициента поглощения различных элементов модуля от угла падения прямой составляющей СИ. Причем для различных конструкций модуля ими были получены две зависимости поглощения, одна из которых характеризовала поглощение СИ ФЭ панелью модуля, а другая – алюминиевым абсорбером модуля.

В Московском энергетическом институте Кадыров [69] проводил диссертационное исследование по работе ФЭТ коллекторов в климатических условиях Кыргызстана. Была оценена их работа в сравнении с ФЭМ и СК одинаковой площади, проведены исследования локальных характеристик температурных полей и скоростей теплоносителя в канале плоского ФЭТМ.

Исследовательские работы показали, что на эффективную эксплуатацию оказывают большое влияние климатические условия и целый ряд факторов, в частности требования потребителей.

Большое количество исследований, связанных с ФЭТУ, направлено на изучение их работы по двум технологическим схемам с принудительной или с естественной циркуляцией. Эти схемы придают работе ФЭТМ определенные преимущества и недостатки. Например, количество воды в баке-аккумуляторе оказывает существенное влияние на эффективность работы установок. Альтернативных схем, которые бы заключали в себе основные преимущества двух основных схем и при этом повысили бы эффективность установок на основе ФЭТМ не выявлено.

1.2.3 Основные конструкции фотоэлектрических тепловых модулей и их теоретическая эффективность

Различные требования потребителей приводят разработчиков к необходимости создания ФЭТМ со строго установленными параметрами. Это, в свою очередь, приводит к разработке различных конструкций модулей, создаваемых под необходимые задачи и требования. Можно выделить три основных типа конструкций:

- ФЭТМ с тепловым абсорбером «лист-труба»;
- ФЭТМ с тепловым абсорбером в виде канала;
- ФЭТМ с двумя абсорберами.

ФЭТМ с тепловым абсорбером «лист-труба». Представляет собой традиционный СК, на рабочей поверхности которого размещена фотоэлектрическая панель (рисунок 1.8 а, см. рисунок 1.3 а). Один из самых распространённых типов модулей. Такой тип модулей, как уже

отмечалось, можно назвать ФЭТ коллектором, так как в его основе положен типовой СК. Существуют различные конфигурации этой конструкции, отличающиеся главным образом количеством прозрачных покрытий. Однако стоит отметить, что с установкой дополнительного покрытия увеличивается отражение СИ и снижаются тепловые потери с рабочей стороны СЭ, что ведет к ухудшению выработки электроэнергии ФЭТМ.

ФЭТМ с тепловым абсорбером в виде канала. Представляет собой канал с жидкостью, расположенный непосредственно рядом с фотоэлектрической панелью с его тыльной или лицевой стороны. Если канал с жидкостью расположен перед рабочей поверхностью СЭ (с лицевой стороны), то этот канал поглощает часть СИ, проходящего сквозь него, и является частью теплового абсорбера. Главное преимущество таких конструкций относительно рассмотренной конструкции типа «лист-труба» является равномерный по всей площади СЭ отвод тепла. На рисунке 1.8 б показан ФЭТМ с каналом, заполненным жидкостью и расположенным над ФЭ панелью. Соответственно при такой конструкции модуля необходимо, чтобы спектр поглощения жидкости отличался от спектра поглощения СЭ. При этом желательно, чтобы жидкость поглощала как можно больше солнечных лучей с длиной волны той части спектра, которая не используется СЭ. Тогда СЭ будут работать в условиях приближенных к оптимальным, благодаря отводу неиспользуемой (излишней) энергии слоем жидкости. Из выше изложенного понятно, что такая конструкция накладывает ограничения на используемую жидкость в канале ФЭТМ. В действительности подобрать подходящие жидкости сложно, поскольку они поглощают часть рабочего спектра фотопреобразователей. При использовании воды в качестве такой жидкости в существующих модулях электрическая эффективность уменьшается на 4% [70].

Данная конструкция модуля, кроме выше рассмотренной, может иметь еще три основные конфигурации. В первом варианте теплоотводящий канал располагается за ФЭ панелью (рисунок 1.8 в), т.е. прилегает к тыльной стороне СЭ. Во втором варианте конструкции тепловой абсорбер состоит из множества вертикальных прямоугольных каналов (рисунок 1.8 г, см. рисунок 1.8 б), т.е. теплоотводящий канал располагается за ФЭ панелью и поделен на сегменты (прямоугольные каналы). Такая структура теплового абсорбера образует ребра, которые увеличивают площадь поверхности, отводящей тепло к жидкости, таким образом, повышая теплоотвод.

Третий вариант конфигурации рассматриваемой конструкции изображен на рисунке 1.8 д. В таком модуле поток жидкости протекает над ФЭ панелью, не полностью заполняя пространство между панелью и остекленной поверхностью. Такая конструкция представлена на рисунке 1.8 б, если представить конфигурацию без второй (внутренней) светопрозрачной поверхности. При этом в сравнении с ней в данной конструкции снижено

отражение СИ и материальные затраты, а также требования к остеклению. Но существует и ряд недостатков: увеличенные тепловые потери вследствие испарения жидкости, требования к спектральным характеристикам поглощения жидкости (ее прозрачность в рабочем диапазоне СЭ) и пр.

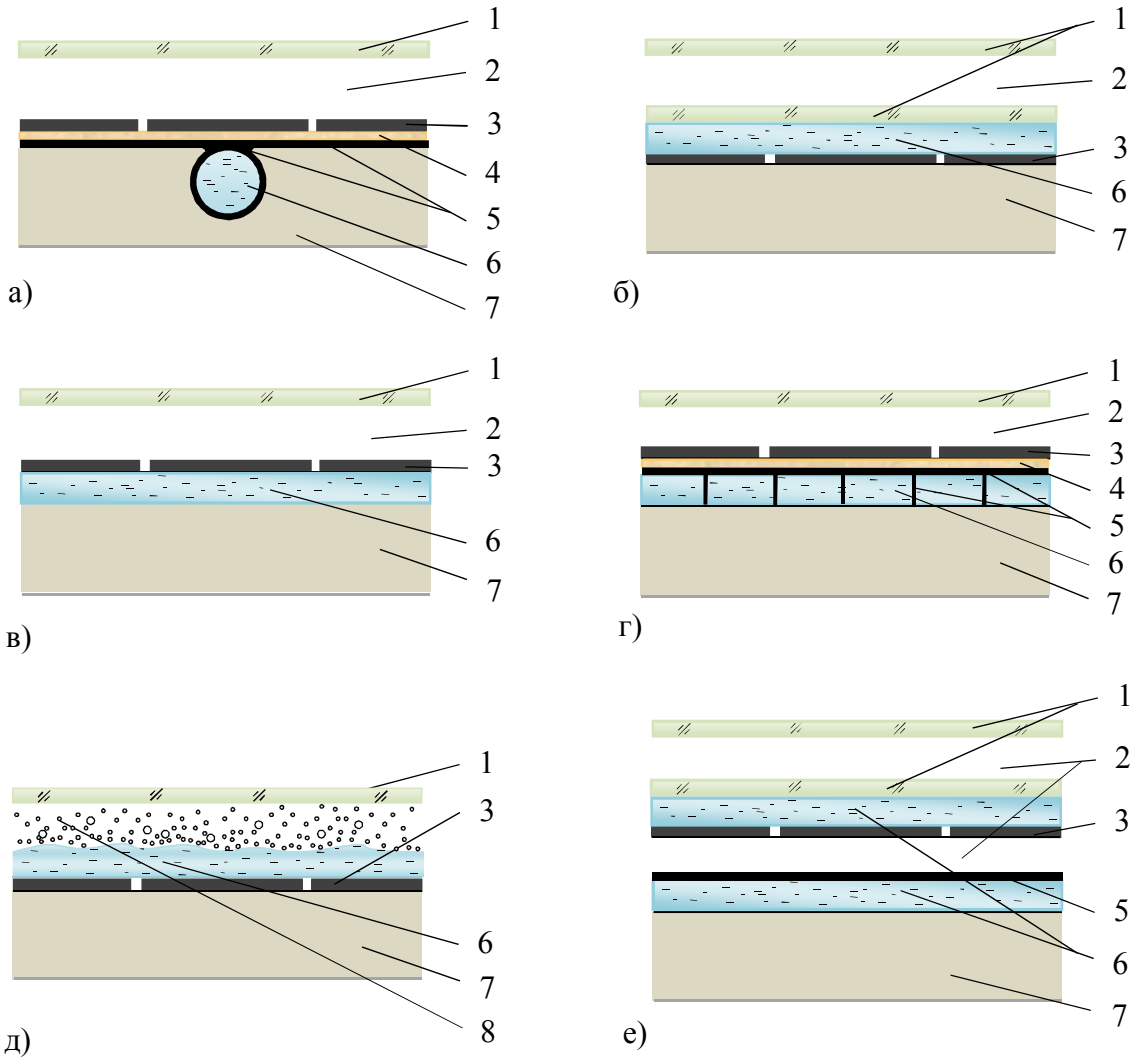


Рисунок 1.8 – Различные конструкции ФЭТМ

а) с абсорбером типа «лист-труба»; б) с абсорбером в виде канала жидкости над ФЭ панелью; в) с абсорбером в виде канала жидкости под ФЭ панелью; г) с абсорбером из прямоугольных каналов; д) с абсорбером в виде канала частично заполненого жидкостью, расположенным над ФЭ панелью; е) с двойным абсорбером и воздушной прослойкой

1 – светопрозрачное покрытие; 2 – воздух; 3 – фотоэлектрическая панель; 4 – теплопроводящее электроизоляционное скрепляющее вещество; 5 – тепловой абсорбер; 6 – теплоноситель (жидкость); 7 – теплоизоляционный материал; 8 – пары жидкости

ФЭТМ с двумя абсорберами. В конструкции с двумя абсорберами предусмотрено использование ламинированной фотоэлектрической панели в качестве первой (основной)

поглощающей СИ поверхности и черной металлической панели в качестве второй поверхности. При этом фотоэлектрическая панель должна состоять из СЭ с сетчатым тыльным контактом, чтобы пропускать длинноволновую часть солнечного спектра, не участвующего в фотоэффекте. Такому схемному решению будет соответствовать конструкция, изображенная на рисунке 1.8 в, только ФЭ панель будет состоять из СЭ с тыльным сетчатым контактом, и на противоположной от СЭ стороне канала (на дне) будет располагаться отдельный черный абсорбер. Конструкция с двумя абсорберами имеет более высокий тепловой и электрический КПД по сравнению с вариантом, приведенным на рисунке 1.8 в, однако отметим, что стоимость СЭ с тыльным сетчатым контактом выше, чем обычных.

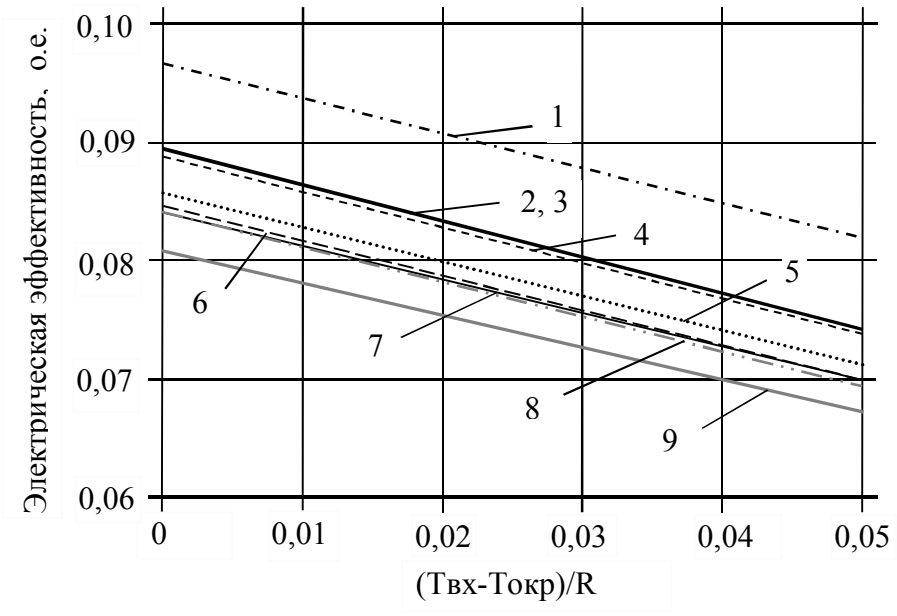
Два абсорбера также содержат конструкции с двумя каналами жидкости, прилегающими к каждому из абсорберов (рисунок 1.8 е). Поток воды протекает сначала через верхний канал с СЭ, а затем через канал расположенный ниже. Существует несколько конфигураций отмеченной выше конструкции, одна из которых не содержит изоляционный воздушный слой между основным и вторым каналом. Такая конструкция ФЭТМ была исследована по программе Массачусетского технологического института [71], по итогам которой отмечен высокий тепловой КПД этой конструкции.

Основным недостатком данной конструкции стоит считать наличие двух абсорберов, влияющих на окончательную цену и обуславливающих её высокий вес, который необходимо учитывать при монтаже установок и прочих ситуациях.

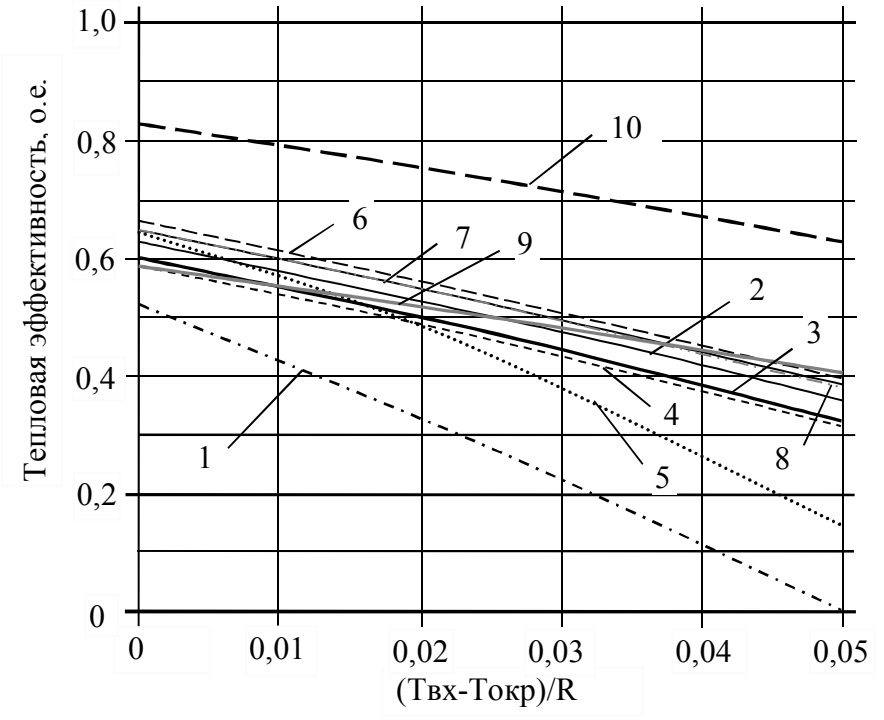
Зондаг с соавторами [68] провели теоретические оценки эффективности работы основных конструкций и конфигураций ФЭТМ. Они рассмотрели девять вариантов конструкций (рисунок 1.9). При оценке предполагалось, что модули работают по схеме с принудительной циркуляцией теплоносителя с расходом жидкости 76 кг/м^2·ч. В расчетах солнечная радиация (R) была принята на уровне 800 Вт/м^2, температура окружающей среды равной 20 ^{o}C, скорость ветра – 1 м/с, температура неба – 4 ^{o}C и угол наклона коллектора соответствовал значению 45 ^{o}.

Из анализа рисунков можно сделать вывод, что конструкция с каналом для жидкости, располагаемым за фотоэлектрической панелью, имеет преимущества по производству электроэнергии и при этом эффективность выработки по теплу незначительно ниже, чем в других рассмотренных конструкциях. К тому же основным преимуществом такой конструкции является ее простота, а, следовательно, высокая надежность при эксплуатации.

Самой эффективной выработкой электроэнергии среди рассмотренных обладает ФЭТМ с конструкцией «лист-труба» без остекления.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Показатели эффективности различных конфигураций ФЭТМ [68]

а) электрический КПД ФЭТМ; б) тепловой КПД ФЭТМ

1 – с абсорбером типа «лист-труба» и без остекления; 2 – с абсорбером в виде канала под ФЭ панелью прозрачной для длинноволновой части спектра СИ; 3 – с абсорбером в виде канала жидкости под ФЭ панелью; 4 – с абсорбером типа «лист-труба» и одинарным остеклением; 5 – с абсорбером в виде канала частично заполненного жидкостью, расположенным над ФЭ панелью; 6 – с двойным абсорбером и воздушной прослойкой; 7 – с двойным абсорбером без воздушной прослойки; 8 – с абсорбером в виде канала жидкости над ФЭ панелью; 9 – с абсорбером «лист-труба» и двойным остеклением; 10 – СК

Самой эффективной выработкой тепловой энергии обладают ФЭТМ с двумя абсорберами с изоляционным воздушным слоем и ФЭТМ с конструкцией «лист-труба» с двойным светопрозрачным покрытием, каждый из которых эффективнее при различных режимах эксплуатации (рисунок 1.9 б). Также заметно, насколько хуже работают СЭ ФЭТМ в конструкциях «лист-труба» с двойным прозрачным покрытием.

1.2.4 Математические модели фотоэлектрических тепловых установок

Замещение одного объекта другим с целью получения информациии о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется моделированием [72].

Математические модели более универсальны, они позволяют проводить различные эксперименты, не требуя при этом большого количества материальных ресурсов, позволяют прогнозировать развитие явлений или процессов [73,74].

1.2.4.1. Методы моделирования и виды математических моделей фотоэлектрических тепловых модулей и установок на их основе

При описании математических моделей ФЭТУ можно выделить два метода – аналитический и численный. Аналитический метод математического моделирования представляет собой некие функции, описывающие зависимость выходных характеристик, различных показателей моделируемого объекта от входных воздействий, внутренних параметров, независимых аргументов и пр. Аналитические методы позволяют получить точные решения в виде математических формул. Они позволяют решить задачу в общем виде и получить полную информацию о поведении объекта. Но их решение бывает весьма затруднено, и не все задачи могут иметь решения.

Численные методы подразумевают приближённые решения математических задач, сводящиеся к выполнению конечного числа элементарных операций над числами [75]. Поскольку при этом необходимо выполнить достаточно большое количество арифметических и логических операций, такие модели удобно реализовывать в компьютерных программных комплексах (ANSYS; MSC. Nastran; TRNSYS). Численные методы позволяют получить частное решение задачи и решить ее в некотором конечномерном пространстве.

При математическом моделировании реального объекта часто используют его статистические или динамические модели. Статистическое моделирование применяется при описании объекта в какой-либо определенный момент времени. Динамическое моделирование применяется при описании объекта (его характеристик) в течение периода времени.

В основе многих математических моделей ФЭТМ применены математические модели плоских жидкостных СК, созданых с учетом специфики ФЭП. Флорсчуетз [76], Санднес и Рекстад [53] в своих работах создали математические модели на основе плоского СК Хоттел-Виллиера с учетом специфики фотоэлектрической тепловой технологии.

В своих работах [77] Зондаг с соавторами предложили деление математических моделей ФЭТМ на 3 вида:

- одномерная (1-D);
- двумерная (2-D);
- трехмерная (3-D, пространственная).

Последняя обеспечивает более подробную и точную математическую модель, наиболее приближенную к объекту и позволяет проводить множество различных операций (исследований, оптимизаций и др.), однако является сложной и требует больших трудозатрат. Одномерная же модель более простая и при применении ее для вычисления ежедневной выработки выдает результаты, не сильно отличающиеся от трехмерной модели [77].

1.2.4.2. Математические модели ФЭТМ

Флорсчуетз [76] модифицировал аналитическую модель Хоттел-Виллиера [78] для плоского СК так, чтобы она могла применяться как математическая модель ФЭТ коллекторов, и все существующие выражения и имеющаяся информация в литературе для теплового коллектора могла использоваться в разработанной им модели.

Санднес и Рекстад [53] также разработали аналитическую модель ФЭТ коллектора, на основе модели Хоттел-Виллиера для плоских СК. Хорошая точность математической модели была подтверждена экспериментальными результатами. Было показано, что за счет ФЭ панели, используемой в качестве поглощающей поверхности в конструкции ФЭТМ, снижается поглощенное СИ примерно на 10%. Отмечалось также, что повышенное тепловое сопротивление между ФЭ панелью и жидким теплоносителем снижает эффективность ФЭТМ.

Берген и Ловвик [45] предложили подробную модель прогнозирования производительности ФЭТ коллекторов на основе энергетического анализа передачи, в которой использовались принципы моделей для плоских СК, представленных Даффи и Бекман [79]. Модель прогнозирует суммарную (тепловую и электрическую) эффективность их ФЭТМ равную около 60-80%.

В работе [41] Гарг и Агарвал выполнили моделирование ФЭТУ с различной площадью СЭ и массовым расходом воды с применением циркуляционного насоса. Системные уравнения модели решены методом конечных разностей.

В работе [80] описана аналитическая модель ФЭТМ в составе термосифонной системы. Коэффициенты теплопотерь модуля и бака были определены экспериментальным путем. Данные математической модели по выработке энергии ФЭТМ хорошо согласуются с экспериментальными. Исследовано влияние некоторых параметров конструкции на ежедневную выработку. Показано, как тепловая эффективность зависит от площади СЭ, занимаемых лицевую поверхность ФЭТМ. Изучено влияние расхода воды в ФЭТМ и объема воды в баке-аккумуляторе на работу установки.

Чтобы оценить технические характеристики ФЭТМ Зондаг и др. создали различные стационарные и динамические математические модели [68, 77]. Они включали одномерные, двумерные и трехмерные модели ФЭТ коллектора, тепловой абсорбер которого имел вид змеевика. Было установлено, что результаты математических моделей соответствуют экспериментальным данным с точностью до 5%. Эксперименты проводили в технологическом университете г. Эйндховена. Использование двухмерных и трехмерных моделей позволяет получить более полную и подробную информацию о работе ФЭТМ, что помогает в усовершенствовании конструкции.

Фраисс и др. [21] отмечали, что при подержании невысоких температур (35 °С) на СЭ ФЭТМ применение установок на их основе наиболее оправдано.

Используя программу моделирования TRNSYS, они изучили гелиостановку на основе ФЭТ коллектора, расположенную во Франции. В качестве теплоносителя использовался пропиленгликоль. Средняя ежегодная эффективность кремниевых СЭ ФЭТ коллектора составила только 6,8 %, в то время как обычных традиционных ФЭМ была равна 9,4 %. Без стеклянного покрытия эффективность ФЭП ФЭТ коллектора составила 10 % благодаря лучшему охлаждению.

Чоу и др. [81] создали численную модель ФЭТМ с термосифонной системой с использованием воды в качестве рабочей жидкости. Точность модели была подтверждена экспериментальными результатами. Созданная ими математическая модель гелиоустановки может моделировать почасовые рабочие параметры установки, в том числе определять мгновенную эффективность тепловой и электрической частей ФЭТМ, а так же его производительность. Энергетические показатели ФЭТУ [82] были исследованы с учетом принятых стандартных параметров (расход воды, температура окружающий среды и т.д.), так же была проанализирована работа установки в «жаркое лето» и «холодную зиму» в климатических условиях Китая. Полученные результаты моделирования получили положительную оценку, высоко был оценен потенциал эксплуатации установки в климатических условиях Китая.

Как видим, одномерная математическая модель позволяет определять в основном потенциальную выработку ФЭТМ и некоторое влияние различных элементов конструкции и их параметров на эффективность. Для более полного и подробного анализа необходима уже трехмерная численная математическая модель.

1.3 Выбор направления исследования

Стоит отметить, что большинство научно-исследовательских работ связано с изучением ФЭТМ, созданных на базе традиционных СК. Это определяется, прежде всего, отработанностью технологии производства СК. В то же время, в других научных работах отмечается, что для ФЭТМ необходим иной подход, особенно он важен для конструкций, материалов модулей и режимов их работы. Поэтому, чтобы повысить эффективность ФЭТМ и установок на их основе, важно проводить исследования, позволяющие выработать оптимальную конструкцию и, по возможности, обеспечить работу ФЭП в наиболее благоприятных условиях.

Проанализировав технологическое развитие ФЭТМ, можно выделить две схемы работы, по которым осуществляется функционирование установок на их основе. Это схемы с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. В модуле, который работает по схеме с естественной циркуляцией, сложно контролировать и поддерживать определённую температуру СЭ на его приемной поверхности. В модуле, который работает по схеме с принудительной циркуляцией, процесс контроля упрощается, но при этом часть вырабатываемой электроэнергии затрачивается на работу насоса. Также в этих схемах существенное влияние на тепловую и электрическую эффективность оказывает объем бака-аккумулятора. В связи с этим важно исследовать и найти альтернативные схемы работы ФЭТМ с учетом специфики их функционирования, чтобы сохранить основные преимущества двух схем и при этом повысить эффективность установок на основе ФЭТМ.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО МОДУЛЯ И РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК НА ЕГО ОСНОВЕ

2.1 Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на выработку электричества и тепла в когенерационном фотоэлектрическом тепловом модуле

Природа СИ такова, что в ФЭ панели только часть солнечной энергии может быть использована для выработки электричества. Оставшаяся энергия солнечной радиации преобразуется в тепло, которое затем поглощается тепловым абсорбером. Поэтому при разработке установок подобных ФЭТМ необходимо четко представлять, в каких пропорциях приходящая солнечная радиация разделяется на части, используемые по этим двум направлениям.

Для оценки распределения энергии в фотоэлектрической панели целесообразно рассмотреть взаимодействие СИ с ФЭП, используя принятый Международным электротехническим комитетом стандартный спектр СИ [83]. Стандартный спектр СИ интенсивностью 1000 Вт/м^2 соответствует прямому СИ на поверхности земли при АМ 1,5, поступающему перпендикулярно на плоскость, расположенную под углом 37° к горизонтальной плоскости, и отраженному от земли излучению с коэффициентом отражения 0,2.

Используя данные по спектральной зависимости энергии стандартного СИ, определим необходимую для дальнейших расчётов спектральную зависимость фотонной плотности СИ [84].

Математически спектральная фотонная плотность СИ представляет собой производную от энергетической спектральной плотности и энергии фотонов. Поскольку функция распределения не определена, то спектральную фотонную плотность на соответствующей длине волны можно определить как

$$R_{\Phi_n} = \frac{R_{ЭН_n}}{E_{\Phi_n}} = \frac{R_{ЭН_n}}{h \cdot v_n} = \frac{R_{ЭН_n} \cdot \lambda_n}{h \cdot c}, \qquad (2.1)$$

где $R_{ЭН_n}$ – спектральная энергетическая плотность потока стандартного СИ на соответствующей длине волны λ_n, Дж/(с·м^2·мкм);

E_{Φ_n} – энергия фотонов с длинной волны λ_n, Дж;

h – постоянная Планка (6,62606896(33)×10^{-34} Дж·с);

v_n – частота соответствующего фотона, Гц;

c – скорость света, м/с;

λ_n – соответствующая длина волны, мкм.

Физический смысл фотонной плотности излучения – это количество фотонов соответствующей длины волны, поступающих на площадь 1 м^2 в секунду. Кривая спектральной зависимости фотонной плотности, построенная по вычисленным данным, представлена на рисунке 2.1.

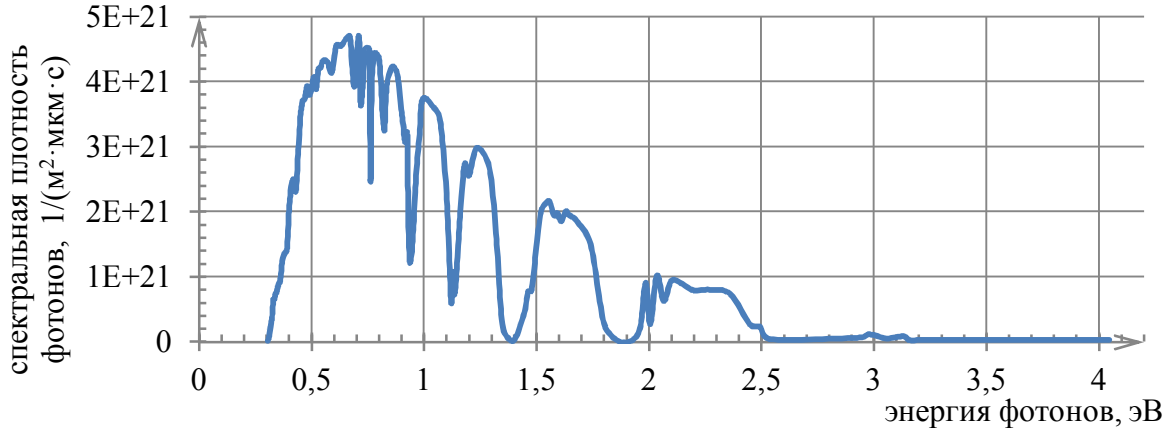


Рисунок 2.1 – Спектральное распределение фотонной плотности стандартного СИ

Современные ФЭП имеют сложную многослойную структуру, что необходимо для достижения высоких технических характеристик. Каждая структура ФЭП может существенно отличаться друг от друга. По этой причине оценку распределения и генерации энергии в ФЭП при воздействии на него СИ необходимо проводить с учетом преобразований, происходящих в каждой его структуре.

Для рассмотрения примем стандартную структуру СЭ на основе кремния. Концепции, которые будут сформулированы при проведении данной оценки на примере монокристаллического кремниевого элемента, приемлемы и для других гомогенных ФЭП, поскольку их структуры во многом схожи.

Оценку преобразований, происходящих в структурах ФЭП, нужно начать с рассмотрения оптических потерь в СЭ, причинами которых являются частичное отражение СИ от рабочей поверхности элемента и затенение контактной сеткой.

Отражение солнечного света, падающего на поверхность кристаллического кремниевого СЭ, не имеющего просветляющего покрытия, составляет около 30 %. Однослойное просветляющее покрытие может уменьшить долю отраженного СИ до значений 10 %, а двухслойное до 3 % [85]. Расчеты проведем для ФЭ панели, состоящей из ФЭП с коэффициентом отражения СИ от элемента равным 0,07. В производимых расчетах также примем, что используется просветляющее покрытие, коэффициент поглощения которого равномерен по всей части солнечного спектра. Тогда спектральное распределение СИ за просветляющим покрытием определится в соответствии с выражением

$$R_{ЭН_n.ПП} = R_{ЭН_n} \cdot \left(1 - k_{отр}\right), \tag{2.2}$$

где $R_{ЭН_n.ПП}$ – спектральная энергетическая плотность на заданной длине волны за просветляющим покрытием, Вт/(м^2·мкм);

$k_{отр}$ – коэффициент отражения рабочей поверхности преобразователя, о.е.

Вторым видом оптических потерь является затенение светочувствительной поверхности фотопреобразователя контактной сеткой, служащей для отвода постоянного электрического тока. С целью уменьшения оптических потерь контакт обычно выполняется в виде металлической сетки с шагом от нескольких миллиметров (для преобразования слабоконцентрированного излучения) до 0,1-0,3 мм (для преобразования сильноконцентрированного излучения). В настоящее время существует технологии, в которых лицевые контакты размещаются на тыльной стороне ФЭП [3]. Поэтому потери от затенения на различных ФЭП могут составлять от 0 до 10-20 % [86]. Расчет произведем для ФЭ панели, состоящей из ФЭП с затенением поверхности полупроводника равным 7 %. Соответственно, плотность энергии СИ на заданной длине волны за просветляющим покрытием и контактной сеткой будут найдена согласно формуле:

$$R_{ЭН_n.ОП} = R_{ЭН_n} \cdot \left(1 - k_{отр}\right) \cdot \left(1 - k_{зат}\right), \tag{2.3}$$

где $R_{ЭН_n.ОП}$ – спектральная энергетическая плотность на заданной длине волны с вычетом оптических потерь, Вт/(м^2·мкм);

$k_{зат}$ – коэффициент затенения рабочей поверхности преобразователя контактной сеткой, о.е.

Теперь вычислим значение, соответствующее интенсивности СИ с учетом оптических потерь:

$$Э_{СИ.ОП} = \left(1 - k_{отр}\right) \cdot \left(1 - k_{зат}\right) \cdot \int_{\lambda_н}^{\lambda_к} R_{ЭН} d\lambda\,, \tag{2.4}$$

где $R_{эн}$ – функция, определяющая спектральную энергетическую плотность стандартного СИ, Вт/(м^2·мкм);

$\lambda_н$ – длина волны, соответствующая начальному значению спектральной плотности энергии СИ, мкм;

$\lambda_к$ – длина волны, соответствующая конечному значению спектральной плотности энергии СИ, мкм.

Поскольку функция, которая бы определяла стандартный спектр СИ неизвестна, то для приближенного вычисления определенного интеграла воспользуемся методом трапеций [87]. Тогда интенсивность энергии СИ с вычетом оптических потерь может быть найдена в соответствии с выражением:

$$Э_{СИ.ОП} = (1-k_{отр})\cdot(1-k_{зат})\cdot\int_{\lambda_н}^{\lambda_к} R_{ЭН}\,d\lambda \approx (1-k_{отр})\cdot(1-k_{зат})\cdot\frac{R_{ЭН0}+R_{ЭН1}}{2}\cdot(\lambda_1-\lambda_0)+$$
$$+\frac{R_{ЭН1}+R_{ЭН2}}{2}\cdot(\lambda_2-\lambda_1)+\ldots+\frac{R_{ЭНn-1}+R_{ЭНn}}{2}\cdot(\lambda_n-\lambda_{n-1}) \quad (2.5)$$

где $R_{ЭН0}, R_{ЭН1}, \ldots, R_{ЭНn-1}, R_{ЭНn}$ – энергетические плотности потока СИ на соответствующих им длинах волн $\lambda_0, \lambda_1, \ldots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$, при этом $\lambda_0 = \lambda_н$, $\lambda_n = \lambda_к$.

Результаты выполненных расчетов показывают, что интенсивность энергии СИ, попадающая на рабочую поверхность, за вычетом оптических потерь, составит 857,63 Вт/м^2. А оптические потери – 133,97 Вт/м^2.

Теперь рассмотрим и оценим преобразования, происходящие в основной структуре СЭ. Задачу рассмотрим в рамках ранее развитого подхода [88], который основан на рассмотрении взаимодействия фотонов всего спектра СИ с полупроводником. Отметим, что в отличие от Комптон-эффекта, когда энергия фотона передается электрону частично, при фотоэффекте энергия фотона передается электрону полностью, и фотон при этом поглощается. В этом случае часть энергии фотона расходуется на отрыв валентного электрона в полупроводнике (для кремния $E_{св}$=1,1эВ), а остаток энергии рассеивается в полупроводнике. Даже самые высокоэнергичные фотоны стандартного спектра не способны образовывать более одной электронно-дырочной пары. Наиболее эффективными фотонами для работы кремниевого фотопреобразователя являются фотоны с энергией, близкой по величине к ширине запрещенной зоны полупроводника. При поглощении фотонов с большей энергией ее излишек будет рассеян в виде тепла. Эта часть энергии (в той части солнечного спектра, где энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны полупроводника) может быть определена из разности энергии фотона и значения ширины запрещенной зоны полупроводника, в нашем случае кремния. В той части спектра, где энергия фотонов меньше ширины запрещенной зоны, СИ свободно проходит через полупроводниковую структуру СЭ и впоследствии может быть трансформировано в тепло (например, на сплошном тыловом контакте фотоэлемента). Непрямые переходы в расчете не рассматривались в силу незначительной доли этой энергии, затраченной на переход электрона в зону проводимости.

Тогда доля энергии, которая участвует в образовании электронно-дырочных пар, в соответствии со спектральным распределением фотонной плотности, определится выражением:

$$Э_{р-п} = Э_{ф.ш.з.з}\cdot(1-k_{отр})\cdot(1-k_{зат})\cdot\int_{\lambda_н}^{\lambda_{ш.з.з}} R_ф\,d\lambda\,, \quad (2.6)$$

где $Э_{ф.ш.з.з}$ – энергия фотона, которую необходимо сообщить электрону для преодоления им ширины запрещенной зоны полупроводника (для кремния 1,1 эВ), Дж;

$R_ф$ – функция, определяющая спектральную фотонную плотность, соответствующую стандартной интенсивности СИ, 1/(м^2·мкм·с);

$\lambda_н$ – длина волны, соответствующая начальному значению энергетической плотности СИ, мкм;

$\lambda_{ш.з.з}$ – длина волны, соответствующая краю основной полосы поглощения, мкм.

Соответственно, избыточная энергия, которая расходуется на сообщение электрону кинетической энергии, определится как

$$Э_{кин} = (1 - k_{отр}) \cdot (1 - k_{зат}) \cdot \int_{\lambda_н}^{\lambda_{ш.з.з}} (Э_ф - Э_{ф.ш.з.з}) \cdot R_ф d\lambda , \quad (2.7)$$

где $Э_ф$ – энергия фотона поглощенная ФЭП, Дж.

Теперь найдем количество энергии той части спектра, которая не поглотится в преобразователе, проинтегрировав спектр СИ с нижним пределом интегрирования 1,12 мкм и верхним пределом, соответствующим конечному значению длины волны спектра СИ.

$$Э_{дл.в} = (1 - k_{отр}) \cdot (1 - k_{зат}) \cdot \int_{\lambda_{кр.ш.з.з}}^{\lambda_к} R_{ЭН} d\lambda , \quad (2.8)$$

где $\lambda_{кр.ш.з.з}$ – длина волны сразу за краем основной полосы поглощения, мкм;

$\lambda_к$ – длина волны, соответствующая краю СИ, за которым энергия равна 0, мкм.

Целесообразно для повышения характеристик СЭ инфракрасное излучение за краем основной полосы поглощения либо отражать, либо пропускать. Излучение можно отражать, применяя различные отражающие слои (из меди, алюминия, серебра, никеля, титана), и слой кремнийорганического каучука на свободной от контактных полос тыльной поверхности [89]. Можно инфракрасное излучение пропускать через СЭ, что достигается снижением толщины легированного слоя, и заменой сплошного тыльного контакта на сетчатый. Такой тип СЭ используется в конструкциях ФЭТМ с двумя абсорберами, которые были отмечены в главе 1. В расчете принято, что используются ФЭП со сплошным тыльным контактом, и вся длинноволновая часть спектра СИ, прошедшая через полупроводник, поглощается в нем.

Результаты расчетов [90, 91], проведенных согласно представленным выше выражениям, отражены на рисунке 2.2.

Используя данные, представленные на рисунке 2.2, можно построить диаграмму преобразования и перераспределения энергии солнечной радиации, падающей на поверхность фотоэлектрической панели (рисунок 2.3). По данным рисунка 2.3 видно, что в фотоэлектрической панели фотоэлектрического теплового модуля при облучении его СИ образуется существенная тепловая энергия. А если тыльный контакт преобразователя сплошной, то и энергия нефотоактивной (длинноволновой) части спектра поглощается в этом контакте и преобразуется в тепло в самой фотоэлектрической панели. Тогда тепловая энергия, образующаяся в структуре СЭ составит 44 % от энергии падающего СИ.

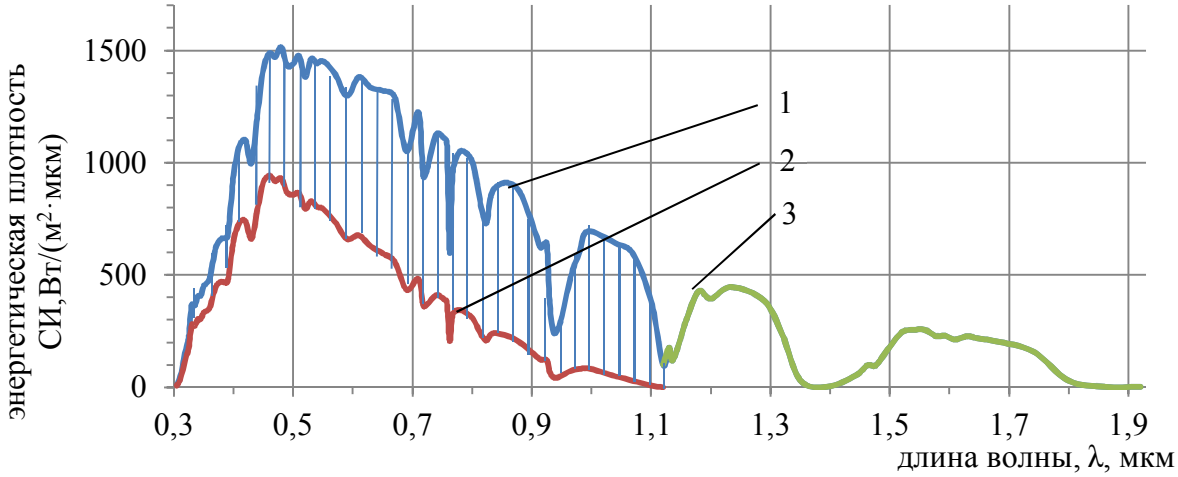


Рисунок 2.2 – Спектральное распределение энергии стандартного СИ в фотоэлектрическом модуле эффективной площадью 1 м^2:

1– доля энергии, поглощенной фотопреобразователем; 2 – доля энергии, преобразованной в тепло в структуре фотоэлемента; 3 – энергия длинноволновой части спектра, пропущенного структурой СЭ

Приведенные выше данные показывают, что в фотоэлектрических панелях фотоэлектрического теплового модуля доля СИ, не участвующего в образовании электронно-дырочных пар и трансформируемого в тепло, составляет значительную величину. Нагрев теплоносителя с помощью этого тепла позволяет в таких установках повысить степень использования приходящей солнечной радиации, повысить энергетический КПД установки, а также повысить эффективность самих фотоэлементов за счет снижения их рабочей температуры.

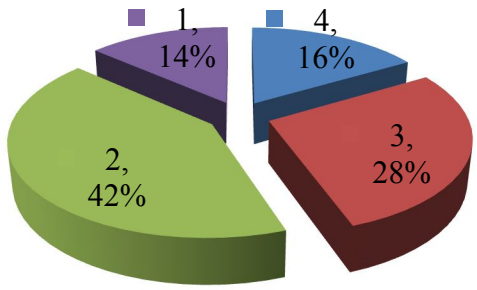


Рисунок 2.3 – Распределение энергии СИ, падающего на поверхность ФЭ панели:

1 – оптические потери; 2 – энергия, направленная на выработку электроэнергии;

3 – энергия, расходуемая на нагрев СЭ; 4 – энергия, пропущенная структурой СЭ

Подробно рассмотренные процессы поглощения и преобразования СИ в структуре СЭ позволяют кроме оценки энергии определить пути создания ФЭП со специально подобранной структурой для использования в ФЭТМ.

2.2 Влияние температуры в широком интервале значений на параметр напряжения холостого хода солнечных элементов

Обычно влияние температуры на параметры СЭ ограничиваются тем же температурным интервалом, который принят при оценке параметров изделий электронной техники и электротехнических полупроводниковых устройств.

На рисунке 1.5 представлены обобщенные температурные зависимости напряжения холостого хода U_{xx}, плотности тока короткого замыкания $I_{кз}$ и максимальной мощности P_{max} кремниевых фотопреобразователей в диапазоне (- 5 до 75 °С). Из анализа представленных данных следует, что характер изменения этих параметров близок к линейному.

Аналогичный характер изменения напряжения холостого хода ФЭП от температуры показан в работе [16], в которой эта зависимость представлена аналитическим выражением:

$$U_{XX} = \frac{E_g}{q}\left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right), \tag{2.9}$$

где T – температура ФЭП, К;

$T_{кр}$=1000 К (расчетов и обоснований в определении величины критической температуры в работе [16] не приведено).

В работе [92] представлена аналитическая зависимость напряжения холостого хода U_{xx} полупроводникового фотопреобразователя от температуры и уровня освещенности одновременно в виде произведения двух множителей.

$$U_{XX} = U_{XX0} \cdot \left[2 - exp\left(\frac{-R_X}{K_0 \cdot R_0}\right)\right], \tag{2.10}$$

где U_{xx0} – теоретическая величина напряжения холостого хода преобразователя с заданной шириной запрещенной зоны при нулевом уровне освещенности, В;

R_x/R_0 – отношение заданного уровня освещенности преобразователя к стандартному СИ АМ 1,5 (1000 Вт/м^2), о.е.;

K_0 – коэффициент, характеризующий индивидуальные свойства преобразователя, такие как степень отражения светового потока от рабочей поверхности, степень затенения контактной сеткой и степень эффективного разделения генерированных излучением неравновесных зарядов, о.е.

Теоретическая величина U_{xx0} представлена в виде выражения

$$U_{XX0} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{E_g}{q} - \frac{3}{2} \cdot \frac{kT}{q}\right] = \frac{1}{2}\frac{E_g}{q}\left[1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{kT}{E_g}\right], \tag{2.11}$$

где T – температура ФЭП, °С;

E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника при нулевой температуре, Дж;

3/2kT – величина эффективного снижения ширины запрещенной зоны при заданной температуре *T,* Дж;

q – заряд электрона, Кл.

При постоянных E_g и T первый множитель выражения (2.10) U_{xx0} является некоторой константой. В этом случае U_{xx} преобразователя определяется уровнем освещенности R_x и коэффициентом K_0, входящими в экспоненциальный член второго множителя выражения (2.10).

В выражении (2.11) температурный член не полностью отражает влияние температуры, не смотря на то, что при стандартной температуре 25 °С, выражение (2.10), содержащее U_{xx0}, хорошо описывает зависимость напряжения холостого хода преобразователя от освещенности. Это обстоятельство послужило предпосылкой введения в выражение (2.11) слагаемого, несущественного при стандартной температуре, в виде $(1–T/T_0)$, где T – текущее значение температуры, К, а T_0 = 298 К.

В этом случае теоретическая величина U_{XX0} определяется как

$$U_{XX0} = \frac{E_g}{q} \cdot \left[1 - \frac{1{,}5kT}{2E_g} - \frac{T}{2T_0} \right]. \qquad (2.12)$$

где T – температура ФЭП, К;

Следует отметить, что полученное выражение близко к выражению (2.9), в котором $T_{кр}$ эквивалентно $2T_0$ выражения (2.12), а слагаемое $\left(1{,}5kT/2E_g\right)$ пренебрежимо мало по сравнению с единицей и не приводится. Введение дополнительного температурного слагаемого в величину теоретического значения U_{xx0} позволяет снять проблему неадекватности изменения величины U_{xx} с ростом температуры преобразователя. Теоретические значения U_{xx} хорошо согласуются с экспериментальными результатами в диапазоне от 0 °С до 150 °С. В этом диапазоне наблюдается весьма близкая к линейной зависимость U_{xx} от T с отрицательным наклоном.

Экспериментальные исследования (рисунок 2.4) в более широком диапазоне температур (до 500 °С) показали, что U_{xx} ФЭП не обращается в ноль при температуре $2T_0$ как это следует из выражения (2.12). Близкая к линейной зависимость U_{xx} от T в районе умеренных температур (0-150 °С) плавно переходит с ростом температуры в близкую к экспоненте зависимость. Это обстоятельство послужило толчком для поиска новых аналитических выражений, более адекватно описывающих рассматриваемую зависимость.

Поэтому в выражение $exp\left(-R_X/\left(K_0 \cdot R_0\right)\right)$ уравнения (2.10) введен множитель $\left(T/T_0\right)^4$ несущественный при стандартной температуре.

Для описания зависимости U_{xx0} от температуры в качестве базиса было выбрано распределение типа $exp\left(-\left(\left(T-T_{\sigma}\right)/\sigma_i\right)^2\right)$, в котором $T_{\sigma}=0$ °С, а T – текущее значение температуры °С, σ – дисперсия распределения, величина которой должна определяться шириной запрещенной зоны полупроводникового материала преобразователя.

В результате в работе [93] при участии автора получено выражение для U_{xx0}:

$$U_{XX0}=\frac{E_g}{q}\cdot exp\left[-\left(\frac{T}{\sigma_i}\right)^2\right]. \tag{2.13}$$

Для кремниевых ФЭП на основе экспериментально-расчетного анализа величина σ определяется как

$$\sigma_{Si}=330K. \tag{2.14}$$

Для других полупроводниковых материалов предложена методика оценки дисперсии в виде

$$\sigma_i=\sigma_{Si}\cdot\left(E_{gX}\Big/E_{gSi}\right)^{0,5}. \tag{2.15}$$

где E_{gX} – ширина запрещенной зоны полупроводника, Дж;

E_{gSi} – ширина запрещенной зоны кремния, Дж.

Таким образом, общее выражение U_{xx} полупроводниковых ФЭП представляется в виде функции:

$$U_{XX}=\frac{E_{gX}}{q}\cdot exp\left[-\left(\frac{T}{\sigma_{Si}}\right)^2\cdot\frac{E_{gSi}}{E_{gX}}\right]\cdot\left[2-exp\left(-\frac{R_X}{K_0\cdot R_0}\cdot\left(\frac{T}{T_0}\right)^4\right)\right], \tag{2.16}$$

где R_X, R_0 – текущее и стандартное значение уровня освещенности, Вт/м^2;

T_0 – стандартное значение температуры ФЭП (равное 298 К);

K_0 – параметр экспоненты, отражающий индивидуальные свойства исследуемого фотоэлемента, о.е.

На рисунке 2.4 приведены экспериментальные данные и результаты расчета согласно формуле (2.16), которые хорошо согласуются как для кремниевых, так и для арсенид-галлиевых фотопреобразователей. Эксперименты проводили в лабораторных условиях с использованием имитатора СИ и водного светофильтра [94, 95]. Некоторые особенности проведенных экспериментов представлены в работе [96]. При активном участии автора была проведена серия экспериментов с разными образцами. На рисунке 2.4 представлен один из графиков, иллюстрирующих зависимость напряжения холостого хода от температуры.

Для исследуемых кремниевых преобразователей коэффициент K_0 составляет 7,5, а для элементов на основе GaAs – 5,8. Соответственно, уровни освещенности составили $1R_0$ для кремниевых ФЭП и $0{,}762R_0$ для арсенид-галлиевых ФЭП.

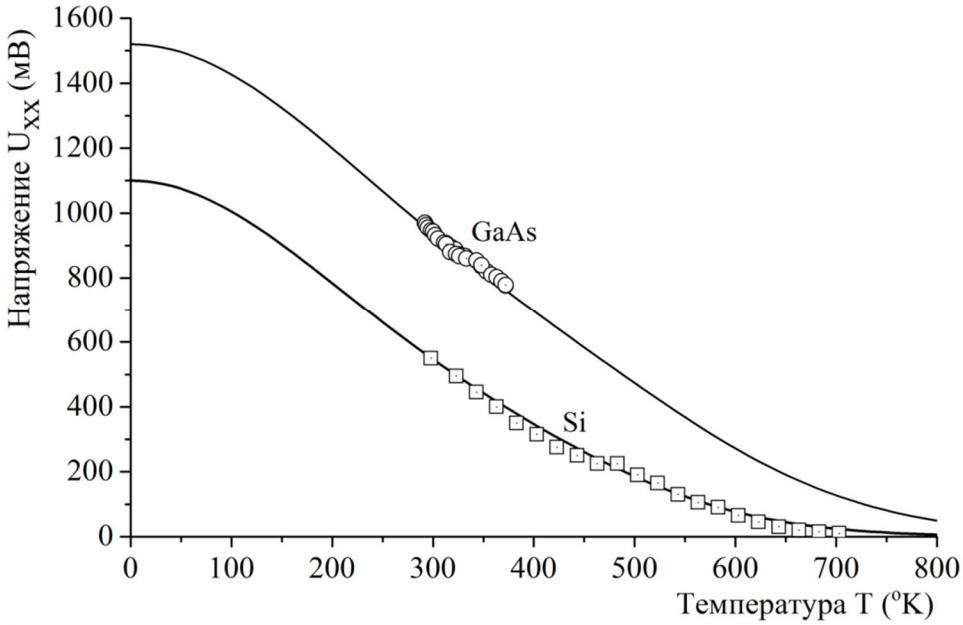


Рисунок 2.4 – Зависимость напряжения холостого хода полупроводниковых ФЭП с различной шириной запрещенной зоны от температуры:
□ – экспериментальные данные для кремниевых преобразователей при уровне освещенности AM 1,5; ○ – экспериментальные данные для арсенид-галлиевых преобразователей при уровне освещенности 0,762 AM 1,5; сплошными линиями показаны расчетные зависимости U_{xx} согласно выражению (2.16) для полупроводниковых преобразователей на основе Si и GaAs.

Полученное выражение позволяет адекватно оценивать напряжение холостого хода фотопреобразователя в широком диапазоне температур. При сверхнизких температурах фотоэлемента ($T << T_0$) первый множитель приближается к предельному значению на уровне потенциала ширины запрещенной зоны полупроводника.

2.3 Определение и обоснование рекомендуемых режимов работы фотоэлектрического теплового модуля в соответствии с требованиями потребителя

Потребности в энергии различных объектов приводят разработчиков к необходимости создания ФЭТМ со строго установленными требованиями по мощности производимого тепла и электричества и их соотношения. В зависимости от необходимых технологических требований потребителей, с учетом обеспечения необходимой температуры теплоносителя на выходе из ФЭТМ, выработано три основных режима его работы [97]:

- 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 чем были выработаны критерии, определяющие установки, предназначенные для определенного режима эксплуатации. Критерии выработаны для модуля, в котором теплоотводящий контур (тепловой приемник) расположен на тыльной стороне СЭ. Такой конструкцией, к примеру, будет обладать традиционный СК, если на его рабочей поверхности разместить СЭ. Таким образом, представленные критерии могут быть применимы к большинству ФЭТМ.

Характерным критерием для ФЭТМ функционирующих по первому режиму является обеспечение максимально возможного отвода теплового потока от СЭ, в частности, от лицевой поверхности СЭ к окружающей среде и от тыльной стороны элементов к контуру теплоносителя. Основной особенностью конструкции модуля, удовлетворяющего данному режиму работы, является отсутствие воздушной прослойки между СЭ и светопрозрачным покрытием. Также при данном режиме работы температура теплоносителя в контуре должна иметь низкие значения (до 35 °С), что обеспечит высокую эффективность выработки энергии. Но поскольку нагреваемая модулем жидкость имеет низкую температуру, то требуется её дальнейший подогрев, и, соответственно, возникает необходимость в дополнительном оборудовании. К примеру, такой режим работы ФЭТМ обеспечивает комбинированная система горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования на основе теплового насоса и ФЭТМ [98].

Второму режиму работы будет соответствовать конструкция ФЭТМ, удовлетворяющая следующим критериям: минимальный тепловой поток от СЭ к окружающей среде, максимальный тепловой поток от тыльной стороны СЭ к теплоносителю. Основной особенностью конструкции модуля, удовлетворяющего этому режиму работы, является двойное и более светопрозрачное покрытие с воздушной прослойкой между ним и СЭ, а также хорошая теплоизоляция тыльной и боковых поверхностей модуля. В такой конструкции существенно снижается выработка электроэнергии СЭ. Поэтому на установках, отвечающих подобному режиму эксплуатации, применяют аморфные кремниевые элементы, поскольку эффективность их работы менее зависима от их рабочей температуры по сравнению с кристаллическими кремниевыми СЭ.

Третьему режиму работы будет соответствовать конструкция ФЭТМ, удовлетворяющая следующим критериям: оптимизированный тепловой поток от СЭ к окружающей среде и к

контуру теплоносителя, обеспечивающий (общий) максимальный коэффициент полезного действия ФЭТМ, но при этом температура теплоносителя на выходе из установки должна соответствовать технологическим требованиям потребителя. В установках, обладающих подобными признаками, обычно используется одинарное светопрозрачное покрытие модуля с воздушной прослойкой между ним и СЭ.

Наиболее востребованными установками, вероятно, станут системы, отвечающие первому и третьему режимам эксплуатации, поскольку в этих случаях полезные характеристики ФЭП проявляются наилучшим образом.

Существенная стоимость удельной произведенной электрической энергии накладывает свои особенности на режимы работы модулей и их конструкцию, а технологические требования потребителей и возможность варьирования соотношения произведенной энергии в одной установке способствует созданию многофункционального устройства, позволяющего работать в нескольких режимах. Поэтому перспективными так же выглядят многофункциональные ФЭТМ, представляющие собой устройства, которые могут работать в различных режимах эксплуатации, удовлетворяя требованиям различных потребителей.

На рисунке 2.5 представлен общий вид разработанного макета ФЭТМ с возможностью работы по двум наиболее востребованным режимам эксплуатации установки.

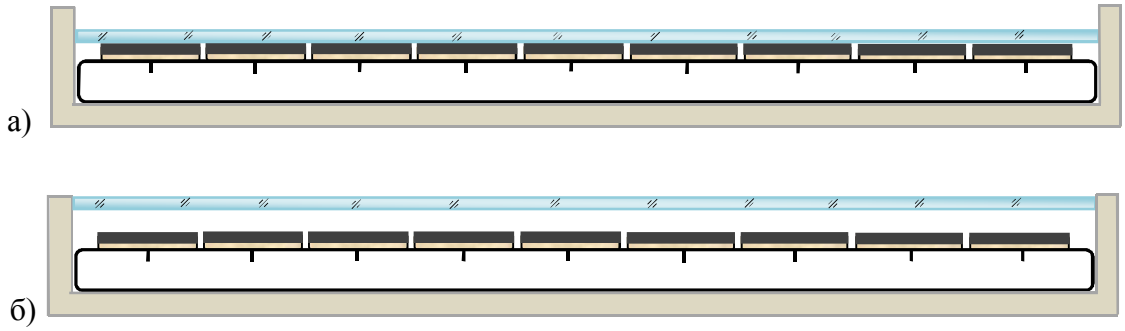


Рисунок 2.5 – Вид в продольном разрезе ФЭТМ:

а) конфигурация без воздушной прослойки; б) конфигурация с воздушной прослойкой

Как было отмечено выше, модуль может соответствовать первому режиму работы без воздушной прослойки между остеклением и батареей СЭ (рисунок 2.5 а). Третьему режиму работы модуль будет соответствовать, имея одинарное остекление, размещенное с зазором, которое одновременно служит и для защиты от внешних воздействий, и для создания парникового эффекта в воздушной прослойке между приемником и стеклом. Двойное остекление ФЭТМ совместно с моно- и поликристалическими СЭ приведет к существенному повышению температуры и снижению эффективной работы ФЭ панели.

С точки зрения потребителей большое значение имеет возможность варьирования соотношением вырабатываемой мощности ФЭТМ, обеспечивая тем самым универсальность установки. Поэтому разрабатываемый ФЭТМ отвечает критериям, обеспечивающим эксплуатацию установки в соответствии с первым и третьим режимом работы. Работа в двух режимах становится возможной благодаря прозрачной изоляции, выполненной таким образом, чтобы позволять регулировать зазор между батареей СЭ и остеклением (см. рисунок 2.5). Регулируемый зазор позволяет изменять соотношение между производимой тепловой и электрической энергией. Возможность применения такой установки в различных режимах работы позволяет использовать её для решения широкого круга задач.

2.4 Обоснование и принцип работы схемы солнечной когенерационной установки

Проведенный обзор показал, что работа установок на основе ФЭТМ осуществляется в основном по схемам с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя. Все эти схемы хорошо работают с традиционными СК. Но для ФЭТМ было важно разработать альтернативную схему работы с учетом специфики функционирования ФЭТМ с конструкцией в виде канала за ФЭ панелью. Также важно было сохранить преимущества двух основных схем и повысить эффективность установок на основе ФЭТМ. В соответствии с этими условиями, а так же с учетом специфики некоторых сельскохозяйственных потребителей, была изобретена и предложена для использования новая технологическая схема солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ (рисунок 2.6) [99, 100, 101].

Предлагаемая ФЭТУ в качестве основных узлов содержит ФЭТМ и расположенный уровнем выше него СК (см. рисунок 2.6). В систему также входят расположенный выше СК напорный бак (если отсутствует централизованное водоснабжение), предназначенный для холодной жидкости, и бак-аккумулятор (термос) располагаемый ниже напорного бака. Установка снабжена системой автоматики, в состав которой входят электромагнитный клапан (нормально закрытый), термореле, датчик которого вмонтирован или в СК, или в ФЭТМ рядом с выходным патрубком. Для обеспечения ручного слива воды из установки имеются вентили.

ФЭТМ, как уже ранее отмечалось, выполнен в виде приемника СИ, представляющего собой фотоэлектрическую панель, размещенную на рабочей (поглощающей) поверхности резервуара, который может иметь форму прямоугольного параллелепипеда (рисунки 2.7 а, 2.8).

СК выполнен в виде приёмника СИ, представляющего собой схожий с ФЭТМ резервуар (рисунок 2.7 б).

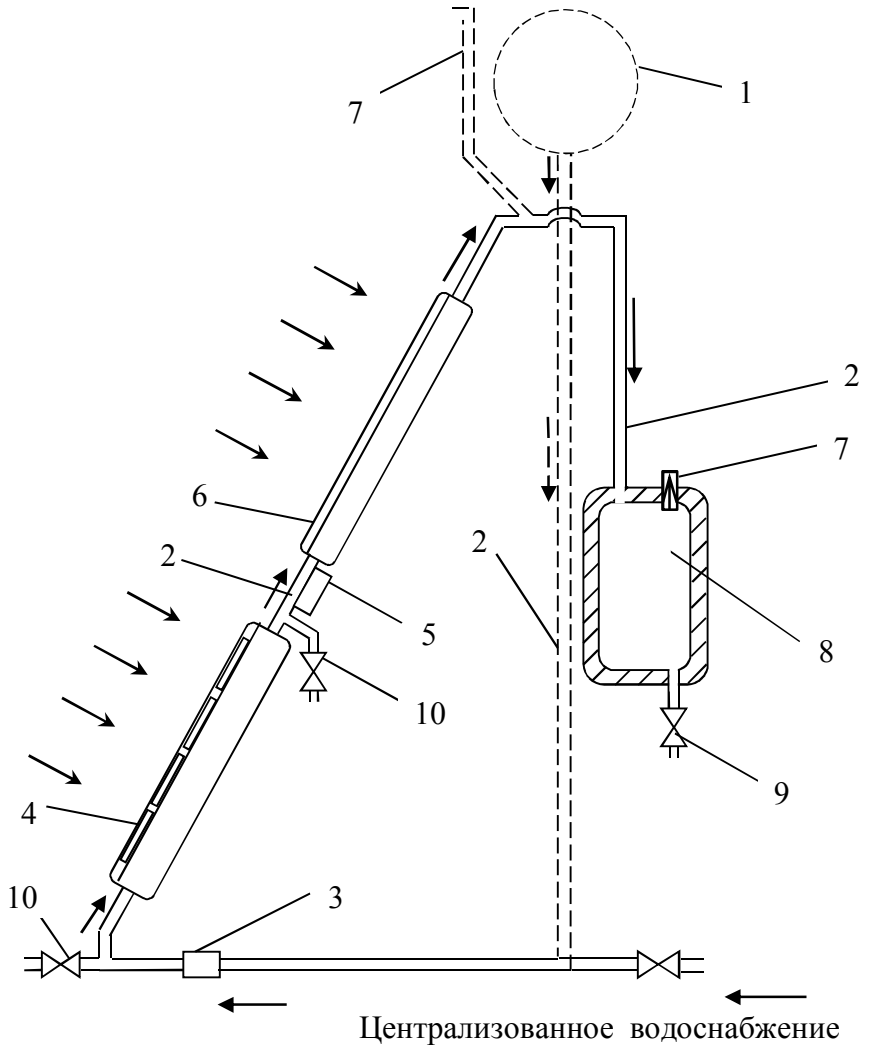
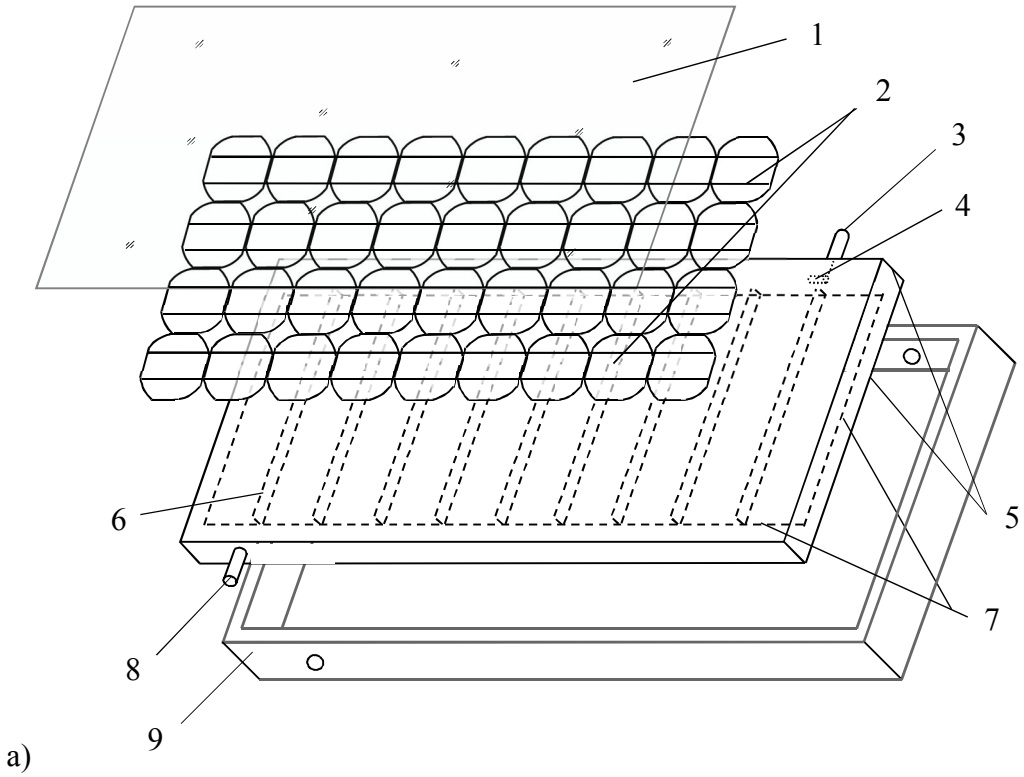
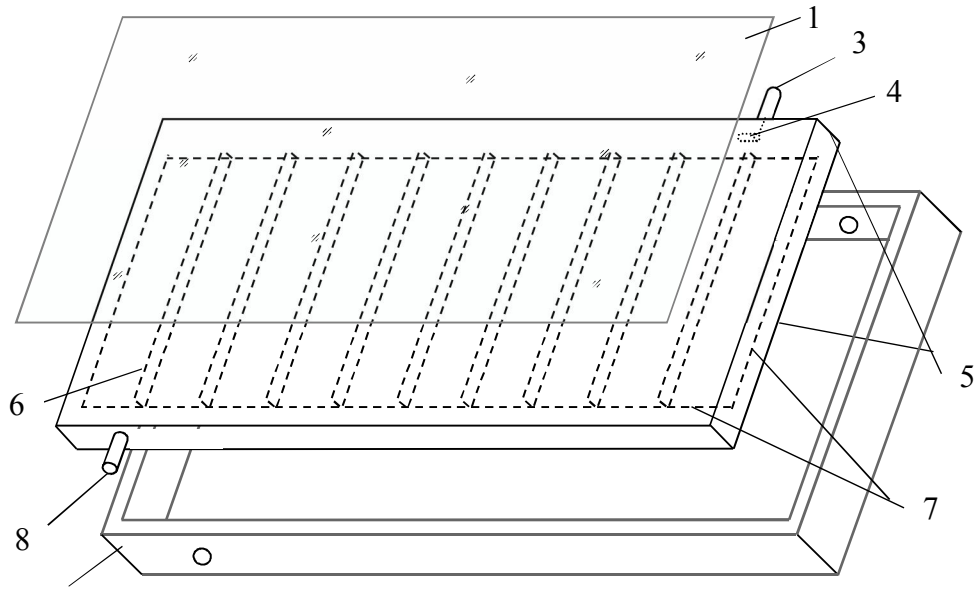


Рисунок 2.6 – Функциональная схема солнечной когенерационной установки:
1 – напорный бак; 2 – трубопровод; 3 – электромагнитный клапан; 4 – ФЭТМ; 5 – термореле;
6 – СК; 7 – воздушный клапан (воздушник); 8 – бак-аккумулятор; 9, 10 – вентили

Рассмотрим подробно работу и процессы, которые происходят в рассматриваемой установке. Из напорного бака холодная вода самотеком по шлангу через патрубок поступает в резервуар ФЭТМ (см. рисунок 2.6). В ФЭТМ под воздействием СИ, как уже было отмечено выше, происходит два процесса. Первый процесс связан с прямым преобразованием солнечной энергии в электричество с помощью полупроводниковых СЭ. Второй связан с нагревом жидкости в баке за счет теплообмена, возникающего между фотоэлектрической панелью и жидкостью в резервуаре, поскольку в структуре СЭ образуется существенная тепловая энергия (см. раздел 2.1). Вследствие температурного градиента у нагретой поверхности резервуара образуется восходящий конвективный слой более нагретой жидкости, в то время как слой менее нагретой жидкости вдоль тыльной стороны резервуара движется вниз. Таким образом, происходит естественная циркуляция жидкости в резервуаре ФЭТМ.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Основные элементы конструкции ФЭТМ (а) и СК (б):
1 – светопрозрачное, защитное покрытие; 2 – фотоэлектрическая панель; 3 – выходной патрубок; 4 – датчик температуры; 5 – резервуар; 6 – теплоотводящие пластины; 7 – перегородка; 8 – входной патрубок; 9 – теплоизоляционный корпус

В СК происходят процессы, аналогичные процессам, происходящим в ФЭТМ, за исключением прямого преобразования СИ в электричество, поскольку отсутствуют СЭ, и вследствие этого поглощение СИ происходит непосредственно поверхностью (абсорбером) резервуара.

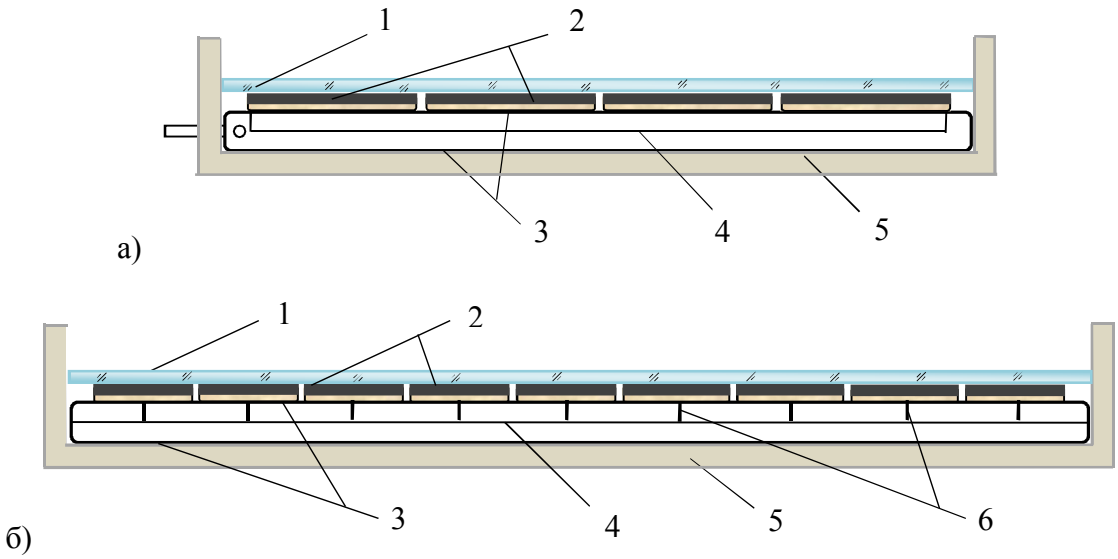


Рисунок 2.8 – Конструкция ФЭТМ в разрезах: а) поперечном б) продольном

1 – светопрозрачное, защитное покрытие; 2 – фотоэлектрическая панель; 3 – резервуар; 4 – перегородка; 5 – теплоизоляционный корпус; 6 – теплоотводящие пластины

При нагреве жидкости в резервуаре ФЭТМ или СК (в зависимости от места установки датчика 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 ее 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 ФЭТУ. Изменять режимы работы установки можно и за счет варьирования зазора между прозрачной изоляцией (стеклом) и ФЭ панелью модуля. Режим работы ФЭТУ определяет также место установки датчиков температуры термореле.

В первом режиме датчик расположен в резервуаре ФЭТМ у выходного патрубка. Вследствие этого с помощью термореле температура фотоэлектрической панели модуля будет не превышать заданного значения. Но некоторое время в первоначальный период работы установки жидкость, вытекающая из СК в бак-аккумулятор, будет иметь температуру несколько ниже необходимой. Постепенно температура на выходе СК будет увеличиваться, и установка выйдет на основной режим работы, в ходе которого температура жидкости, поступающей в бак-аккумулятор, постоянна и в основном зависит от технических

характеристик ФЭТМ, СК, и температуры, установленной на термореле. Данный режим не допускает перегрева ФЭ панели ФЭТМ в течение дня, поддерживая тем самым высокую выработку электроэнергии. Рекомендуется для использования в климатических условиях с высокой среднегодовой температурой воздуха.

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. Но некоторое время в первоначальный период работы установки жидкость, вытекающая из ФЭТМ в СК, будет иметь температуру несколько выше необходимой. Постепенно температура на выходе ФЭТМ будет уменьшаться, и установка выйдет на основной режим работы.

Исходя из технологических особенностей предложенной схемы, СК должен иметь меньший объем резервуара, возможно большую площадь фотоприемника и высокие теплотехнические и оптические характеристики материалов, используемых в его конструкции. Это обеспечит более быстрый нагрев воды в СК по сравнению с ФЭТМ.

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

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 учетом характеристик оборудования и условий эксплуатации установки. Специфика выбора описана в главе 4.

Температура, до которой подогревается жидкость в ФЭТМ, выбирается оператором и обычно составляет 35 °С. В большинстве коммерчески доступных ФЭТМ, работающих по схеме с принудительной циркуляцией теплоносителя, жидкость нагревают до температуры 50-60 °С, что приводит к снижению их электрической эффективности. При сравнении с данным режимом работа ФЭТМ (с кристаллическими кремниевыми СЭ) при нагреве до 35 °С позволяет повысить электрическую эффективность на 9 – 15 %.

Разработанная технологическая схема солнечной когенерационной установки обеспечивает достаточно простую и эффективную работу ФЭТМ. В данной установке нет зависимости от объема и типа бака-аккумулятора, сильно влияющие на эффективность ФЭТМ. В ФЭТМ обеспечивается предварительный подогрев жидкости для ее дальнейшего нагрева в СК. Такое техническое решение обеспечивает повышенный отвод от ФЭ панели модуля тепловой энергии и подогрев холодной жидкости поступающей из напорного бака или водопровода.

2.5 Математическое моделирование установки на основе ФЭТМ

2.5.1 Разработка математической модели

В своих работах Зондаг и соавторы [68, 77] провели теоретические расчеты эффективности различных конструкций ФЭТМ и пришли к выводу, что конструкция ФЭТМ с теплоотводящим каналом позади фотоэлектрической панели является одной из оптимальных (см. рисунки 1.8 и 1.9). В рассматриваемых ими конструкциях использовался тепловой абсорбер проточного типа с очень небольшой толщиной канала около 5 мм, расположенного за фотоэлектрической панелью. В разрабатываемом макете ФЭТМ в связи с технологическими требованиями реализуемой рабочей схемы и с учетом физических процессов конвекции, происходящих в резервуаре модуля, предполагается несколько большая толщина канала. Геометрические параметры резервуара (бака) макета ФЭТМ (рисунок 2.9) следующие: длина – 961 мм, ширина – 431 мм и толщина – 48 мм без учета стенок бака.

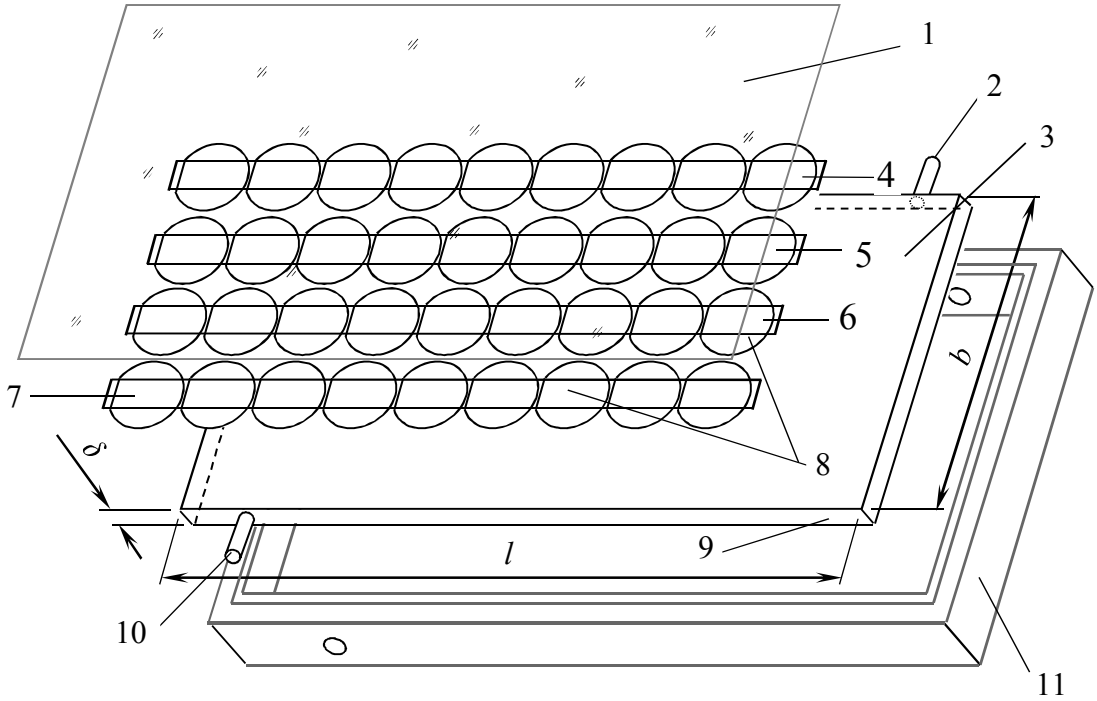


Рисунок 2.9 – Макет солнечного когенерационного модуля:
1 – стекло; 2 – сливной патрубок; 3 – тепловой поглощающий элемент (абсорбер);
4 – четвертая группа ФЭ панели; 5 – третья группа панели; 6 – вторая группа панели;
7 – первая группа панели; 8 – ФЭ панель; 9 – резервуар (бак); 10 – заливной патрубок;
11 – теплоизоляционный корпус; l – длина, b – ширина, δ – толщина резервуара

Разрабатываемый макет ФЭТМ представляет собой резервуар с жидкостью, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, на одной из граней которого расположены СЭ.

Солнечные элементы и часть непокрытого ими теплового абсорбера представляют собой фотоприемник ФЭТМ.

Поскольку принцип работы ФЭТМ и установки на его основе по предложенной схеме отличается от рассмотренных в известных работах (см. раздел 2.4 и глава 1), то для дальнейших исследований необходимо было математически описать их работу.

Математическую модель макета ФЭТМ предлагаемой конструкции (рисунки 2.9 и 2.10) и установки на его основе было решено реализовать в программе MATLAB. При этом для упрощения расчетной части были приняты следующие основные допущения:

- поглощение солнечной энергии покрытиями не влияет на потери модуля;
- тепловой поток через покрытия является равномерным;
- свойства материалов (теплопроводность, геометрические параметры и т.д.) не зависят от температуры;
- при определении тепловых процессов площадь СЭ покрывает всю площадь абсорбера.

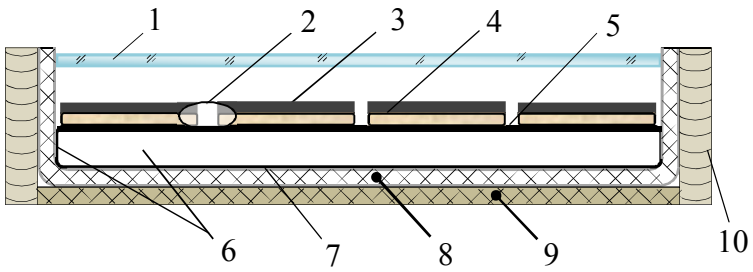


Рисунок 2.10 – Вид макета солнечного когенерационного модуля в поперечном разрезе:
1 – стекло; 2 – фотоприемник СИ; 3 – СЭ; 4 – теплопроводящее электроизоляционное скрепляющее вещество; 5 – абсорбер; 6 – резервуар (бак); 7 – нижняя стенка резервуара; 8 – изоляционный материал №1; 9 – изоляционный материал №2; 10 – элемент несущей конструкции

На первом этапе будет описана часть математической модели, описывающая макет ФЭТМ в квазистационарном состоянии, для чего необходимо оценить распределение энергетического баланса модуля. На втором – часть математической модели макета установки на основе ФЭТМ, описывающая процесс слива и залива жидкости в резервуар модуля.

В рассматриваемом модуле поток СИ $Q_{пад.изл}$ (Вт), падающий на его рабочую поверхность, с учетом оптических $Q_{опт.пот}$ и тепловых потерь $Q_{тепл.пот}$, преобразуется частично в электрическую энергию $Q_{эл}$, частично – в тепловую для нагрева жидкости $Q_{пол.тепл}$ (рисунок 2.11). С учетом указанных потерь и преобразований баланс распределения энергии будет иметь вид:

$$Q_{пад.изл} = Q_{эл} + Q_{пол.тепл} + Q_{опт.пот} + Q_{тепл.пот} . \quad (2.17)$$

Согласно выражению (2.17) доля энергии, направленная на нагревание жидкости, может быть определена:

$$Q_{пол.тепл} = Q_{пад.изл} - Q_{опт.пот} - Q_{эл} - Q_{тепл.пот} \ . \quad (2.18)$$

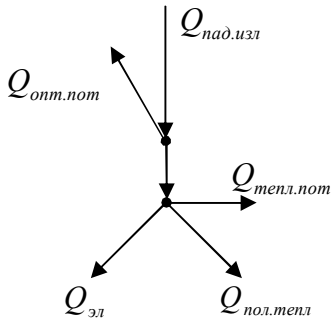


Рисунок 2.11 – Потоки энергии в солнечном когенерационном модуле

Поток СИ, падающий перпендикулярно на модуль, равен:

$$Q_{пад.изл} = F_{пов} \cdot q_{СИ} \ , \quad (2.19)$$

где $F_{пов}$ – площадь поверхности фотоприемника модуля, м^2;

$q_{СИ}$ – плотность потока СИ, Вт/м^2.

При определении оптических потерь модуля следует иметь в виду, что фотоприемник СИ представляет собой тепловой абсорбер, на рабочей поверхности которого расположены СЭ (см. рисунок 2.9). Поскольку в рассматриваемой модели СЭ имеют форму круга (см. рисунок 2.10), то они не покрывают всю область абсорбера и оптические потери модуля определяются по формуле:

$$Q_{опт.пот} = Q_{опт.пот.фэ} + Q_{опт.пот.аб} \ , \quad (2.20)$$

где $Q_{опт.пот.фэ}$ – оптические потери фотоэлектрической части фотоприемника, Вт;

$Q_{опт.пот.аб}$ – оптические потери области фотоприемника, не покрытого СЭ, Вт.

Оптические потери $Q_{опт.пот.фэ}$ рассчитываются по выражению:

$$Q_{опт.пот.фэ} = F_{пр.фэ} \cdot \left(1 - \tau \cdot \left(1 - k_{зат}\right) \cdot \left(1 - k_{отр}\right)\right) \cdot q_{СИ} \, , \quad (2.21)$$

где $F_{пр.фэ}$ – площадь поверхности СЭ модуля, м^2;

τ – коэффициент пропускания остекленной поверхности, около 0,85 о.е.;

$k_{зат}$ – коэффициент затенения СЭ контактной сеткой, около 0,10, о.е.;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения СИ от рабочей поверхности СЭ, около 0,08, о.е.;

Оптические потери $Q_{опт.пот.аб}$ определяются:

$$Q_{опт.пот.аб} = F_{пр.аб} \cdot \left(1 - \tau \cdot \alpha\right) \cdot q_{СИ} \, , \quad (2.22)$$

где $F_{пр.аб}$ – площадь фотоприемника, непокрытая СЭ, м^2;

α – коэффициент поглощения СИ абсорбером, около 0,82, о.е.

Сгенерированная фотоэлектрической частью (СЭ) модуля электроэнергия зависит в основном от типа используемых СЭ и от рабочей температуры:

$$Q_{эл} = \eta_{ФЭ_0} \cdot F_{пр.фэ} \cdot q_{СИ} \cdot \tau \cdot k_{\eta(T)}, \quad (2.23)$$

где $\eta_{ФЭ0}$ – КПД фотоэлектрической части модуля при температуре 25 °С;

$k_{\eta(T)}$ – коэффициент влияния рабочей температуры СЭ модуля на его КПД, о.е.

Коэффициент $k_{\eta(T)}$ определяется согласно выражению [102]:

$$k_{\eta(T)} = 1 - \beta_t \cdot (T_p - T_{ном}), \quad (2.24)$$

где T_p – рабочая температура СЭ, К;

$T_{ном}$ – температура равная 298 К (25 °С), что соответствует стандартным условиям измерений характеристик СЭ;

β_t – коэффициент изменения КПД ФЭП модуля от температуры, около 0,005 $К^{-1}$.

Далее рассчитываются тепловые потери модуля $Q_{тепл.пот}$. Для нахождения $Q_{тепл.пот}$ перейдем от схемы, отражающей потоки энергии (рисунок 2.11), к схеме с тепловыми сопротивлениями, харктеризующими потери через верхнюю $R_{общ.в.из}$, нижнюю $R_{общ.н.из}$ и боковые $R_{общ.б.из}$ поверхности ФЭТМ (рисунок 2.12).

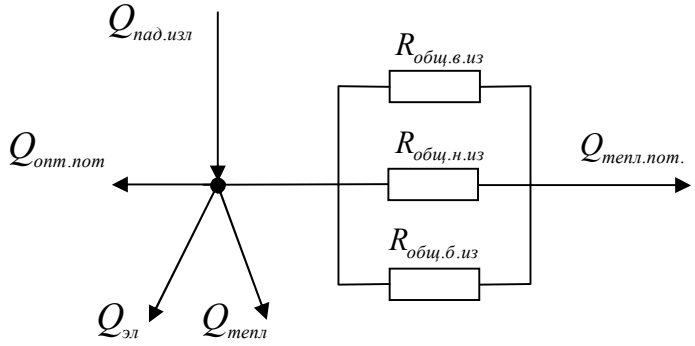


Рисунок 2.12 – Тепловая схема солнечного когенерационного модуля

Каждое из этих трех сопротивлений определяется совокупностью сопротивлений, характеризующих потери энергии через соответствующие направления и в общем итоге представляется схемой изображенной на рисунке 2.13.

Потери энергии через нижнюю часть поверхности $R_{общ.н.из}$ ФЭТМ представлены последовательно параллельной цепью сопротивлений $R^m_{теплклей}$, $R^m_{аб.бака}$, $R^к_{в.бака}$, $R^m_{н.ст.бака}$, $R^m_{н.из1}$, $R^m_{н.из2}$, $R^к_{н.из2-окр}$ и $R^u_{н.из2-окр}$. Соответственно, $R^m_{теплклей}$ – тепловое сопротивление клея, фиксирующего и частично электроизолирующего СЭ. В качестве клея использовался однокомпонентный клей АлСил-5 с коэффициентом теплопроводности 1,4 Вт/(м·К) [103]. Толщина слоя составляла около 1 мм. В качестве основного электроизоляционного слоя использовалось специализированное покрытие [104], нанесенное распылением на тыльную

поверхность СЭ. $R^{m}_{аб.бака}$ – тепловое сопротивление абсорбера (верхней стенки) бака. Сам бак, т.е. резервуар в котором происходит нагрев теплоносителя, выполнен из стальных листов. Стенка резервуара, на которой размещены СЭ, представляет собой стальной лист толщиной 4 мм, остальные стенки резервуара имеют толщину 2 мм. $R^{к}_{в.бака}$ – сопротивление, обусловленное конвекцией воды в баке. $R^{m}_{н.ст.бака}$ – тепловое сопротивление нижней стенки (рисунок 2.10) бака. $R^{m}_{н.из1}$ и $R^{m}_{н.из2}$ – тепловые сопротивления первого и второго изоляционного материала нижней части ФЭТМ. В качестве первого изоляционного материала использовался листовой вспененный полиэтилен толщиной 10 мм (покрытый с одной стороны полированной алюминиевой фольгой) и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{н.из1} = 0{,}035$ Вт/(м·К) [105]. В качестве второго материала (снаружи нижней поверхности) использовалась поливинилхлоридная панель типа «сэндвич» с наполнителем из вспененного пенополистирола, толщина панели 10 мм, коэффициент теплопроводности наполнителя $\lambda_{н.из2} = 0{,}043$ Вт/(м·К) [106]. $R^{к}_{н.из2-окр}$ и $R^{и}_{н.из2-окр}$ – сопротивления, обусловленные конвекцией и излучением в окружающую среду.

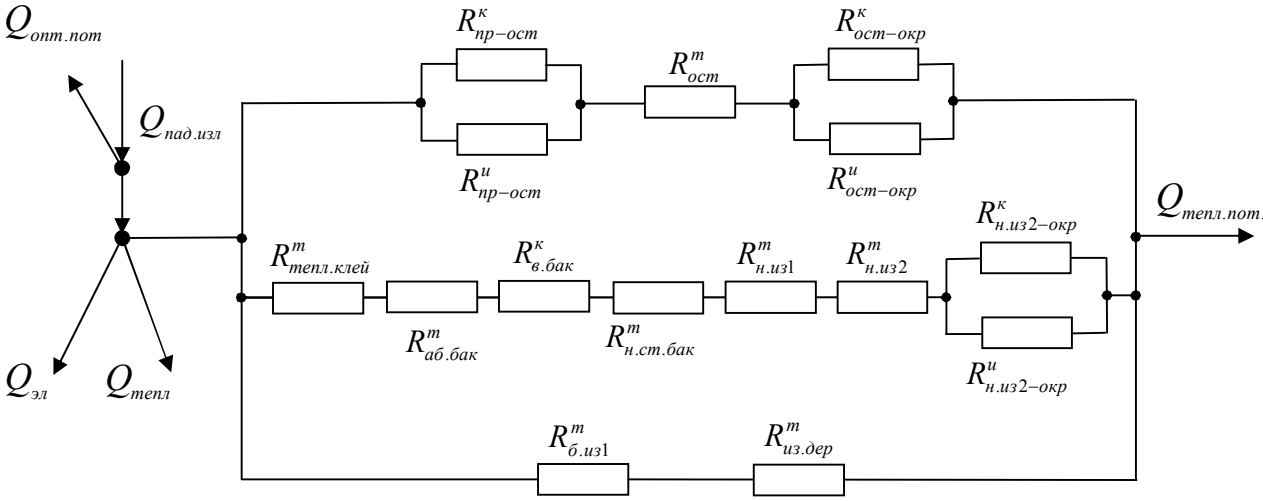


Рисунок 2.13 – Подробная тепловая схема солнечного когенерационного модуля

Таким образом, общее сопротивление тепловому потоку через нижнюю стенку бака модуля определяется как

$$R_{общ.н.из} = R^{m}_{тепл.клей} + R^{m}_{аб.бак} + R^{к}_{в.бак} + R^{m}_{н.ст.бак} + R^{m}_{н.из1} + R^{m}_{н.из2} + \frac{1}{1/R^{к}_{н.из2-окр} + 1/R^{и}_{н.из2-окр}}, \quad (2.25)$$

Выражение (2.25) можно переписать следующим образом:

$$R_{общ.н.из} = \frac{\delta_{тепл.клей}}{\lambda_{тепл.клей}} + \frac{\delta_{аб.бак}}{\lambda_{мат.бак}} + \frac{\delta_{бак}}{\lambda_{жид.экв}} + \frac{\delta_{н.ст.бак}}{\lambda_{мат.бак}} + \frac{\delta_{н.из1}}{\lambda_{н.из1}} + \frac{\delta_{н.из2}}{\lambda_{н.из2}} + \frac{1}{h^{к}_{н.из2-окр} + h^{и}_{н.из2-окр}}, \quad (2.26)$$

где $\delta_{тепл.клей}$ – толщина теплопроводящего клея, фиксирующего СЭ, м;

$\lambda_{тепл.клей}$ – коэффициент теплопроводности клея, фиксирующего СЭ, Вт/(м·К);

$\delta_{аб.бак}$ и $\delta_{н.ст.бак}$ – толщина абсорбера (верхней стенки) и нижней стенки бака, м;

$\lambda_{мат.бак}$ – коэффициент теплопроводности материала бака, Вт/(м·К);

$\delta_{н.из1}$ и $\delta_{н.из2}$ – толщина первого и второго изоляционного материала нижней части модуля, м;

$\delta_{бак}$ – толщина зазора между верхней и нижней стенками бака, м;

$\lambda_{жид.экв}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности для жидкости в узком зазоре, Вт/(м^2·К);

$\lambda_{н.из1}$ и $\lambda_{н.из2}$ – коэффициент теплопроводности первого и второго изоляционного материала, Вт/(м·К);

$h^{к}_{н.из2–окр}$ и $h^{и}_{н.из2–окр}$ – коэффициенты конвективного теплообмена и теплопередачи излучением между изоляционным материалом снаружи модуля и окружающей средой, Вт/(м^2·К).

Эквивалентный коэффициент теплопроводности для жидкости в узком зазоре находится по следующей формуле [107]:

$$\lambda_{жид.экв} = 0{,}18 \cdot \lambda_{жид} \cdot Ra_{жид}^{\frac{1}{4}}, \tag{2.27}$$

где $\lambda_{жид}$ – коэффициент теплопроводности жидкости Вт/(м·К).

$Ra_{жид}$ – число Релея. Рассчитывается по следующему выражению:

$$Ra_{жид} = \frac{g \cdot \beta_{жид} \cdot (T_{аб–в.бак} - T_{в.бак–н.ст}) \cdot \delta_{бак}^{3}}{\nu_{жид} \cdot a_{жид}}, \tag{2.28}$$

где g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с^2;

$\beta_{жид}$ – коэффициент объемного расширения жидкости, К$^{-1}$;

$T_{аб-в.бак}$ – температура на границе абсорбера с водой, К;

$T_{в.бак-н.ст}$ – температура на границе нижней стенки бака с водой, К;

$\nu_{жид}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с;

$a_{жид}$ – коэффициент температуропроводности для жидкости, м^2/с.

Коэффициент теплопередачи конвекцией в окружающую среду зависит от скорости ветра v и определяется при помощи полученного Мак-Адамсом размерного соотношения [108]:

$$h^{к}_{из-окр} = 5{,}7 + 3{,}8 \cdot v, \tag{2.29}$$

где v – скорость ветра, м/с.

Коэффициент теплопередачи излучением от материала изоляции в окружающую среду равен:

$$h^{и}_{из-окр} = \frac{\sigma \cdot \left(T^2_{н.из2} + T^2_{окр}\right) \cdot \left(T_{н.из2} + T_{окр}\right)}{1/\varepsilon_{н.из2} + 1/\varepsilon_{почв} - 1}, \tag{2.30}$$

где σ – постоянная Стефана Больцмана, σ = 5,67·10^{-8} Вт/(м^{2}К^4);

$T_{н.из2}$ – температура внешней изоляции в нижней части модуля, K;

$T_{окр}$ – температура окружающей среды, K;

$\varepsilon_{н.из2}$ – коэффициент излучения внешней изоляции в нижней части модуля, 0,9 о.е. [109];

$\varepsilon_{почв}$ – степень черноты почвы, 0,9 о.е. [109].

Расчет тепловых потерь ФЭТМ проводится методом итераций. В начале определяются сопротивления $R^{m}_{тепл.клей}$, $R^{m}_{аб.бак}$, $R^{m}_{н.ст.бак}$, $R^{m}_{н.из1}$, $R^{m}_{н.из2}$ и $R^{к}_{н.из2-окр}$. Затем $R^{к}_{в.бак}$ и $R^{и}_{н.из2-окр}$.

Для нахождения $R^{к}_{в.бак}$ произвольно задается $T_{аб-в.бак}$ и вычисляется температура на границе нижней стенки бака с водой:

$$T_{в.бак-н.ст} = 2 \cdot T_{в.бак} - T_{аб-в.бак}. \qquad (2.31)$$

Температура воды в баке $T_{в.бак}$ является известной величиной, определяющие ее выражения представлены ниже.

Для нахождения $R^{и}_{н.из2-окр}$ определяется $T_{н.из2}$. Учитывая, что поток энергии от границы соприкосновения абсорбера с водой к нижней стенке бака равен потоку энергии от границы соприкосновения абсорбера с водой к внешней изоляции (изоляционный материал №2), получаем выражение для температуры внешней изоляции на тыльной стороне модуля:

$$T_{н.из2} = T_{аб-в.бак} - \left(R^{к}_{в.бак} + R^{m}_{н.ст.бак} + R^{m}_{н.из1} + R^{m}_{н.из2}\right) \cdot \frac{\left(T_{аб-в.бак} - T_{в.бак-н.ст}\right)}{R^{к}_{в.бак}}. \qquad (2.32)$$

Таким же образом, исходя из равенства потока энергии, можно найти температуру на границе абсорбера бака с водой:

$$T_{аб-в.бак} = T_{в.бак-н.ст} + R^{к}_{в.бак} \cdot \frac{\left(T_{в.бак-н.ст} - T_{окр}\right)}{R^{m}_{н.ст.бак} + R^{m}_{н.из1} + R^{m}_{н.из2} + \dfrac{1}{h^{к}_{н.из2-окр} + h^{и}_{н.из2-окр}}}. \qquad (2.33)$$

Если разность полученного значения $T_{аб-в.бак}$ и ее начального произвольно выбранного значения находится в пределах заданного допуска, то расчет завершается. В противном случае полученное значение $T_{аб-в.бак}$ принимается за исходное и процесс вычислений повторяется. Допуском задается точность вычислений.

С учетом равенства распространения плотности потока энергии от приемника к границе соприкосновения абсорбера с водой и от границы соприкосновения нижней стенки бака с водой к окружающей среде можно получить выражение для определения температуры приемника:

$$T_{пр} = T_{аб-в.бак} + \left(R^{m}_{тепл.клей} + R^{m}_{аб.бак}\right) \cdot \frac{\left(T_{в.бак-н.ст} - T_{окр}\right)}{R^{m}_{н.ст.бак} + R^{m}_{н.из1} + R^{m}_{н.из2} + \dfrac{1}{h^{к}_{н.из2-окр} + h^{и}_{н.из2-окр}}}. \qquad (2.34)$$

Плотность теплового потока энергии от фотопреобразователей к окружающей среде через нижнюю поверхность ФЭТМ, определяется из следующего выражения [107]:

$$q_{н.пов.} = \frac{\left(T_{пр} - T_{окр}\right)}{R_{общ.н.из}}. \quad (2.35)$$

Тогда потери энергии через нижнюю поверхность ФЭТМ равны:

$$Q_{н.пов} = F_{н.пов} \cdot q_{н.пов}, \quad (2.36)$$

где $F_{н.пов}$ – площадь нижней поверхности изоляции ФЭТМ, м^2.

Теперь определим потери энергии через прозрачную изоляцию, которые обусловлены конвективным теплообменом между приемником и остеклением $R^{к}_{пр-ост}$, излучательной способностью приемника $R^{и}_{пр-ост}$, а также термическим сопротивлением стекла $R_{ост}$, потерями в окружающую среду от остекления излучением $R^{и}_{ост-окр}$ и конвекцией $R^{к}_{ост-окр}$.

Согласно рисункам 2.12 и 2.13 общее сопротивление участка приемник – окружающая среда через верхнюю поверхность ФЭТМ находится по формуле:

$$R_{общ.в.из} = \frac{1}{1/R^{к}_{пр-ост} + 1/R^{и}_{пр-ост}} + R_{ост} + \frac{1}{1/R^{к}_{ост-окр} + 1/R^{и}_{ост-окр}}. \quad (2.37)$$

Выражение (2.37) можно переписать

$$R_{общ.в.из} = \frac{1}{h^{к}_{пр-ост} + h^{и}_{пр\text{-}ост}} + \frac{\delta_{ост}}{\lambda_{ост}} + \frac{1}{h^{к}_{ост\text{-}окр} + h^{и}_{ост\text{-}окр}}, \quad (2.38)$$

где $h^{к}_{пр-ост}$ и $h^{и}_{пр\text{-}ост}$ – коэффициенты конвективного теплообмена и теплопередачи излучением в зазоре между приемником и остеклением, Вт/(м^2·К);

$\delta_{ост}$ – толщина теплопроводности стекла, м;

$\lambda_{ост}$ – коэффициент теплопроводности стекла, Вт/(м·К);

$h^{к}_{ост-окр}$ и $h^{и}_{ост-окр}$ – коэффициенты конвективного теплообмена и теплопередачи излучением от стекла к окружающей среде, Вт/(м^2·К).

Коэффициент конвективного теплообмена $h^{к}_{пр-ост}$ определяется, используя формулу для нахождения числа Нуссельта:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}. \quad (2.39)$$

Тогда, соответственно:

$$h^{к}_{пр-ост} = \frac{Nu \cdot \lambda_{возд}}{L}, \quad (2.40)$$

где $\lambda_{возд}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

L – толщина воздушного зазора между приемником и прозрачным покрытием, м.

Для нахождения числа Нуссельта используется зависимость от числа Рэлея *Ra*, которая получена экспериментальным путем Холландсом [110]:

$$Nu = 1 + 1{,}44 \cdot \left(1 - \frac{1708 \cdot (sin 1{,}8\alpha)^{1,6}}{Ra \cdot cos\,\alpha}\right) \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot cos\,\alpha}\right)^{+} + \left(\left(\frac{Ra \cdot cos\,\alpha}{5830}\right)^{1/3} - 1\right)^{+}, \quad (2.41)$$

где α – угол наклона модуля к горизонтальной плоскости, °.

Знак «+» после скобки означает, что в расчет принимаются только положительные значения, при отрицательных значениях принимается 0.

Число Релея рассчитывается согласно формуле:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta_{возд} \cdot (T_{пр} - T_{ост}) \cdot L^3}{\nu_{возд} \cdot a_{возд}}, \quad (2.42)$$

где $\beta_{возд}$ – коэффициент объемного расширения воздуха, для идеального газа $\beta = 1/T$, K^{-1};

$T_{ост}$ – температура стекла, K;

$\nu_{возд}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, $м^2/с$;

$a_{возд}$ – коэффициент температуропроводности воздуха, $м^2/с$.

Затем находится коэффициент теплоотдачи излучением в зазоре между приемником и остеклением по формуле:

$$h^{и}_{пр\text{-}ост} = \frac{\sigma \cdot (T^2_{пр} + T^2_{ост}) \cdot (T_{пр} + T_{ост})}{1/\varepsilon_{пр} + 1/\varepsilon_{ост} - 1}, \quad (2.43)$$

где $\varepsilon_{пр}$ и $\varepsilon_{ост}$ – коэффициент излучения приемника и остекления модуля соответственно, о.е.

Далее определяется коэффициент конвективной теплоотдачи от стекла к окружающей среде согласно выражению (2.29):

$$h^{к}_{ост\text{-}окр} = 5{,}7 + 3{,}8 \cdot \nu\,.$$

А коэффициент теплоотдачи излучением вычисляется по формуле:

$$h^{и}_{ост\text{–}окр} = \frac{\sigma \cdot (T^2_{ост} + T^2_{неб}) \cdot (T_{ост} + T_{неб})}{1/\varepsilon_{ост} + 1/\varepsilon_{неб} - 1}, \quad (2.44)$$

где $T_{неб}$ – эффективная температура небосвода, K;

$\varepsilon_{неб}$ – степень черноты небосвода, о.е.

Поскольку $\varepsilon_{неб} = 1$, то формула (2.44) приобретает вид:

$$h^{и}_{ост\text{–}окр} = \varepsilon_{ост} \cdot \sigma \cdot (T^2_{ост} + T^2_{неб}) \cdot (T_{ост} + T_{неб}), \quad (2.45)$$

Согласно выражению, полученному Суинбенком [108], температуру небосвода можно определить, используя соотношение:

$$T_{неб} = 0{,}0552 \cdot T^{1,5}_{окр}\,. \quad (2.46)$$

Теперь определяется коэффициент $R^{к}_{ост\text{-}окр}$ и $R_{ост}$. Затем $R^{к}_{пр\text{–}ост}$, $R^{и}_{пр\text{-}ост}$, $R^{и}_{ост\text{–}окр}$.

Для нахождения $R^{к}_{пр-ост}$, $R^{и}_{пр\text{-}ост}$, $R^{и}_{ост-окр}$, а затем $R_{общ.в.из}$ задается произвольно $T_{ост}$. По результатам расчетов с учетом равенства плотности потока энергии от приемника к окружающей среде и от приемника к стеклу, находится $T_{ост}$:

$$T_{ост} = T_{пр} - \left(\frac{1}{h^{к}_{пр-ост} + h^{и}_{пр\text{-}ост}} \right) \cdot \frac{\left(T_{пр} - T_{окр}\right)}{R_{общ.в.из}}. \quad (2.47)$$

Если точность $T_{ост}$ не соответствует заданной, то найденное значение $T_{ост}$ принимается за исходное и процесс вычислений повторяется.

После получения окончательных значений $R_{общ.в.из}$ и $T_{ост}$ находится тепловой поток через верхнюю поверхность (стекло) ФЭТМ:

$$Q_{в.пов} = F_{из.ост} \cdot q_{в.пов} = F_{из.ост} \cdot \frac{\left(T_{пр} - T_{окр}\right)}{R_{общ.в.из}}, \quad (2.48)$$

где $F_{из.ост}$ – площадь остекленной поверхности ФЭТМ, м^2.

На следующем этапе определяются потери энергии через боковые стенки модуля в окружающую среду. Сопротивление каждой боковой стенки представлено двумя последовательными термическими сопротивлениями изоляционного материала №1 $R^{m}_{б.из1}$ и несущей конструкции, выполненной из дерева $R^{m}_{из.дер}$ (см. рисунок 2.12 и 2.13). Потерями, вызванными конвекцией и излучением внешней изоляции в окружающую среду, пренебрегаем, поскольку они незначительны в сравнении с остальными потерями через изоляцию, а также из-за малой площади боковой поверхности модуля. Коэффициент теплопроводности дерева принимается равным $\lambda_{из.дер} = 0{,}15$ Вт/(м·К), толщина изоляции равна $\delta_{из.дер} = 0{,}02$ м.

Следовательно, общее сопротивление боковой поверхности модуля определится как:

$$R_{общ.б.из} = R^{m}_{б.из1} + R^{m}_{из.дер} = \frac{\delta_{б.из1}}{\lambda_{б.из1}} + \frac{\delta_{из.дер}}{\lambda_{из.дер}}. \quad (2.49)$$

Поскольку внутренняя боковая поверхность модуля граничит с приемником, баком и воздушным зазором, то температура между внутренней изоляцией и эквивалентной боковой поверхностью определится следующим образом:

$$T_{пр.бок.экв} = \frac{0{,}5 \cdot (T_{пр} + T_{н.ст-н.из1}) + 0{,}5 \cdot \left(T_{пр} + T_{ост}\right)}{2}, \quad (2.50)$$

где $T_{н.ст-н.из1}$ – температура на границе нижней стенки бака с изоляционным материалом №1, К.

Затем находится тепловой поток через боковые поверхности изоляции согласно выражению:

$$Q_{б.пов} = F_{б.пов} \cdot q_{б.пов} = F_{б.пов} \cdot \frac{\left(T_{пр.бок.экв} - T_{окр}\right)}{R_{общ.б.из}}, \quad (2.51)$$

где $F_{б.пов}$ – площадь боковой поверхности изоляции ФЭТМ, м^2.

Тогда общие потери $Q_{тепл.пот}$ (см. рисунок 2.13) рассматриваемого модуля определяются как сумма потерь через нижнюю, верхнюю и боковые стенки модуля:

$$Q_{тепл.пот} = Q_{н.пов} + Q_{в.пов} + Q_{б.пов}. \quad (2.52)$$

Решение вышеописанных уравнений производится итерационным методом при помощи программы MATLAB.

По результатам найденных значений КПД тепловой части ФЭТМ в определенный квазистационарный момент времени равен:

$$\eta_{тепл} = \frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{пад.изл}} = \frac{Q_{пад.изл} - Q_{опт.пот} - Q_{эл} - Q_{тепл.пот}}{Q_{пад.изл}}. \quad (2.53)$$

Выражение для определения величины КПД фотоэлектрической части модуля имеет вид:

$$\eta_{эл} = \frac{Q_{эл}}{Q_{пад.изл}}. \quad (2.54)$$

Общий КПД модуля может быть найден путем суммирования двух выше отмеченных показателей эффективности.

Рассмотрим теперь, как реализуется процесс моделирования работы ФЭТМ в течение определенного времени. Время моделирования разделяется на равные промежутки с интервалом равным одной минуте (при необходимости интервал можно изменить), т.е. каждое новое состояние процесса функционирования установки определяется через промежуток времени равный одной минуте.

Исходно задается начальное (первое) значение температуры воды в баке (в середине бака) $T_{в.бак}$ (в последующем оно определяется в процессе моделирования). Поскольку данные сравниваются с практическими, то первое значение $T_{в.бак}$ принимается равным реальной температуре бака в момент начала измерений. Затем на основе данной температуры, а также данных, характеризующих условия эксплуатации, согласно уравнениям (2.17-2.52) находится доля энергии, направленная на нагревание жидкости $Q_{пол.тепл}$. С учетом этой энергии вычисляется значение температуры воды в баке $T'_{в.бак}$ в конце шага моделирования, т.е. через одну минуту:

$$T'_{в.бак} = T_{в.бак} + \frac{Q^{мин}_{пол.тепл}}{C_в \cdot m_{жид.бак}}, \quad (2.55)$$

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;

$Q_{пол.тепл}^{мин}$ – доля энергии, идущая на нагрев жидкости за интервал времени равный одной минуте, Дж;

$C_в$ – удельная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·°С);

$m_{жидбак}$ – общая масса жидкости в резервуаре, кг.

С целью анализа работы 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 нем жидкости наблюдается ее температурное расслоение по высоте резервуара, причем оно близко 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 была стать постоянной. Однако на разнице температур сказывается залив воды с постоянно возрастающей температурой (вследствие постепенного нагрева ее в напорном баке).

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

$$T_{жид.в.с}^{д.сл-зал} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{бака}, \tag{2.56}$$

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 воды в баке до слива, т.е. половина высоты бака, м;

$\Delta T_{бака}$ – разность температур между верхним и средним слоем воды в баке перед сливом, °С.

Согласно принятой в разделе 2.3 рабочей схемы установки, ее работа осуществляется следующим образом. При достижении нагреваемой жидкостью в верхнем слое бака 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 $T_{закр.клап}$. Таким образом, термореле открывает клапан при одной температуре, а закрывает при другой.

Соответственно, температура верхнего слоя жидкости в баке в конце шага моделирования найденная по выражению (2.56) проверяется на условие $T_{жид.в.с}^{д.сл-зал} > T_{откр.клап}$. Если данное условие не выполняется, значит, продолжается процесс нагрева жидкости. В таком случае $T'_{в.бак}$ принимается равной $T_{в.бак}$ и начинается новый шаг моделирования. Процесс

продолжается до того момента пока не будет выполнено условие $T_{жид.в.с}^{д.сл-зал} > T_{откр.клап}$, означающее начало процесса слива-залива воды.

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

$$T_{жид.в.с}^{п.сл-зал} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{бака} + k'_T \cdot T_{жид.н.бак}, \quad (2.57)$$

где k'_T – эмпирический коэффициент, определяющий влияние температуры жидкости в напорном баке на разницу температуры в верхнем и среднем слое бака;

$T_{жид.н.бак}$ – температура жидкости в напорном баке, °С.

Процесс слива и залива жидкости разделяется на два условных этапа (поскольку процесс слива и залива воды происходит одновременно). На первом этапе происходит слив жидкости. После слива, за одну минуту с учетом принятого расхода (около 0,6 л/мин) высота (условная) оставшейся жидкости относительно среднего слоя жидкости в резервуаре модуля составит:

$$h_{усл} = h_{бака} - \frac{g_{расх}}{l \cdot \delta}, \quad (2.58)$$

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:

$$T_{жид.в.с}^{п.сл} = T'_{в.бак} + k_T \cdot h_{усл} + k'_T \cdot T_{жид.н.бак}. \quad (2.59)$$

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

$$T_{жид.с.с}^{п.сл1} = T_{жид.с.с}^{д.сл} - 0{,}5 \cdot \left(T_{жид.в.с}^{д.сл} - T_{жид.в.с}^{п.сл}\right), \quad (2.60)$$

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

$T_{жид.с.с}^{д.сл}$ – температура среднего слоя жидкости в начале шага моделирования, °С.

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

$$T_{жид.с.с}^{п.сл2} = \frac{\left(m_{зал.жид} \cdot T_{жид.н.бак} + \left(m_{жид.бак} - m_{зал.жид}\right) \cdot T_{жид.с.с}^{п.сл1}\right)}{m_{жид.бак}}, \quad (2.61)$$

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 (2.57). Затем по

уравнениям (2.58-2.61) находится $T^{п.сл2}_{жид.с.с}$ 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 предыдущем шаге моделирования выполнялось первое условие $T^{п.сл-зал}_{жид.в.с} > T_{откр.клап}$. В этом случае $T^{п.сл2}_{жид.с.с}$ принимается равной $T_{в.бак}$ и начинается новый шаг моделирования. Если же вышеперечисленные условия не выполняются, т.е. клапан закрыт, то $T_{в.бак}$ принимается равной $T'_{в.бак}$, найденной по выражению (2.55) 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.

Представленные алгоритмы расчетов являются базовыми для математической модели фотоэлектрического теплового модуля.

2.5.2 Результаты теоретического исследования разработанной модели

Согласно произведенным с помощью математической модели расчетам получены зависимости КПД ФЭТМ от средней температуры жидкости ($T_{сред.жид}$) внутри его резервуара (бака) от температуры окружающей среды ($T_{окр}$) и интенсивности СИ (R) (рисунках 2.14, 2.15, 2.16). В расчетах температура окружающей среды была принята 20 ^{o}C, скорость ветра – 1 м/с и угол наклона ФЭТМ соответствовал значению 45^{o}.

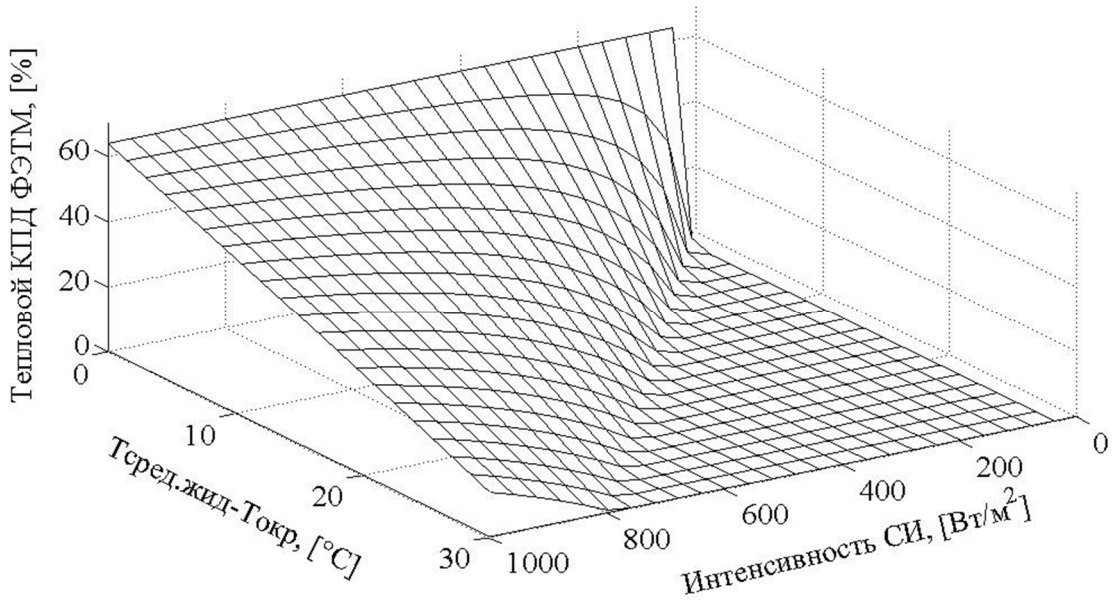


Рисунок 2.14 – Расчетные зависимости величин КПД тепловой части ФЭТМ от температур жидкости, окружающей среды и интенсивности СИ

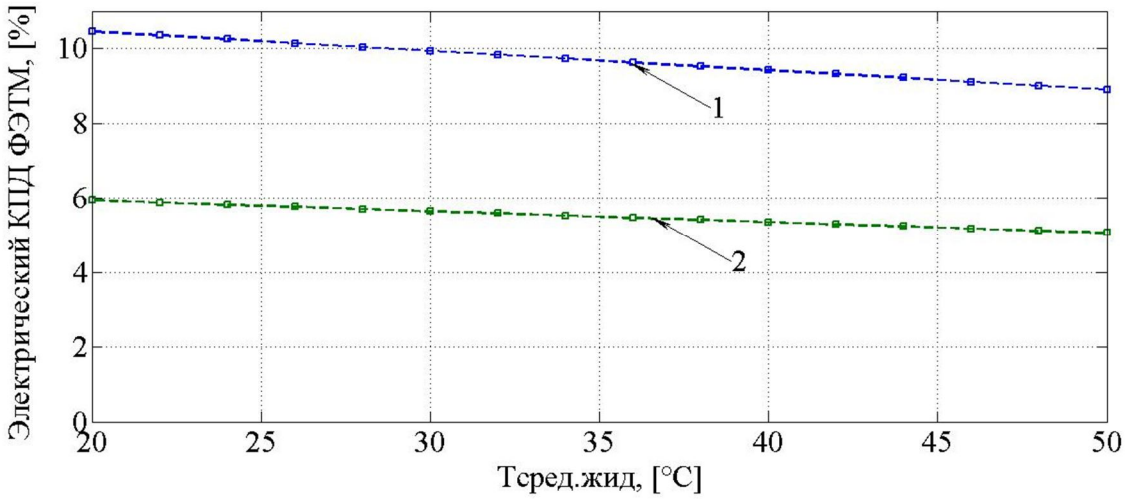


Рисунок 2.15 – Расчетные зависимости величин КПД фотоэлектрической части ФЭТМ от средней температуры жидкости в его резервуаре:
1 – КПД относительно площади ФЭП; 2 – КПД относительно площади фотоприемника ФЭТМ

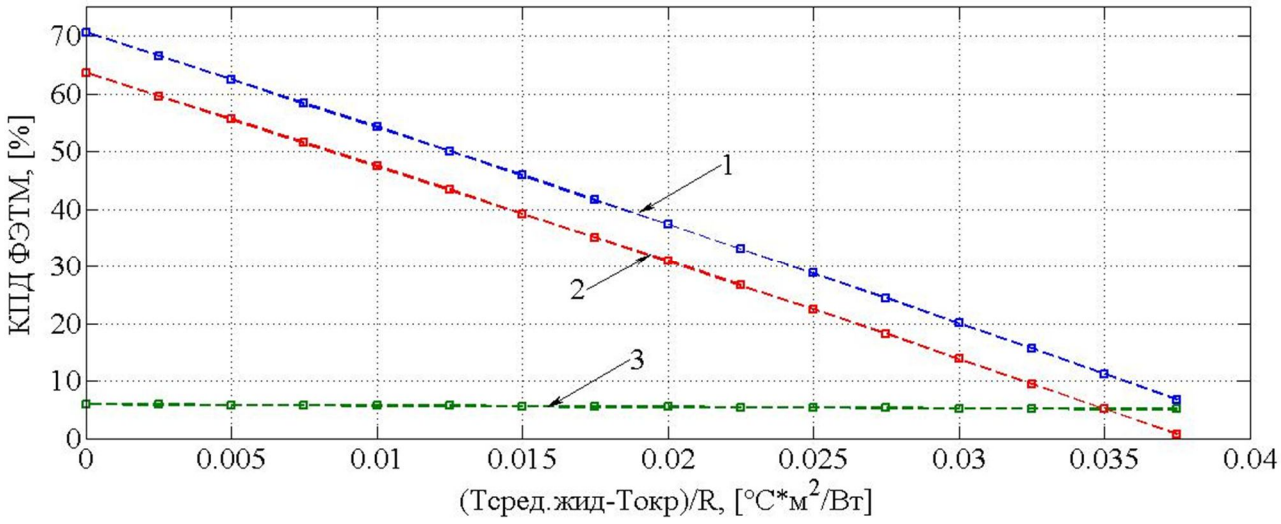
Из рисунка 2.14 видно, что модуль обладает невысокими параметрами эффективности. Связано это в первую очередь с характеристиками материалов использованных в конструкции макета ФЭТМ. Поэтому максимальная эффективность модуля имеет значения около 0,56 из-за низких оптических свойств стекла, абсорбера и СЭ. Одной из причин невысокой тепловой эффективности макета также является малая толщина тепловой изоляции модуля.

КПД фотоэлектрической части модуля, практически не зависит от температуры окружающей среды, поэтому на рисунке 2.15 представлены данные фотоэлектрической части в зависимости от средней температуры жидкости, нагреваемой в резервуаре ФЭТМ.

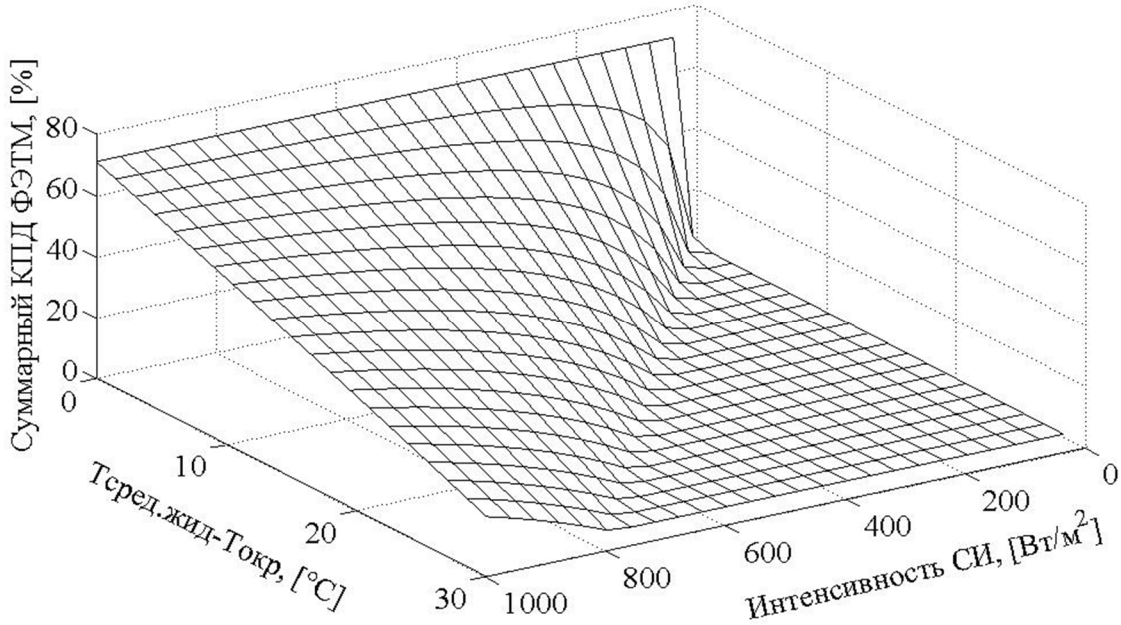
На рисунке 2.16 представлены некоторые уже отраженные выше зависимости КПД фотоэлектрической части модуля, а также зависимости, характеризующие суммарные значения КПД модуля. Из рисунка видим, что суммарный КПД ФЭТМ достигает свыше 56 %. Тем самым эффективность использования солнечной энергии становится весьма существенной.

Следует отметить, что фактический макет ФЭТМ и процесс естественной циркуляции жидкости только в его резервуаре обеспечивает эффективный нагрев жидкости до невысоких температур (35 °С) при его эксплуатации в период, когда температура окружающей среды выше 10 °С. Для более эффективной эксплуатации ФЭТМ требуется увеличение толщины тепловой изоляции, а также использование материалов, обеспечивающих высокий (свыше 0,7) оптический КПД.

Важно также оценить отношение произведенной тепловой энергии к электрической (рисунок 2.17), в частности это необходимо для рассмотрения совместной работы с ТН [111].



а)



б)

Рисунок 2.16 – Расчетные зависимости величин КПД ФЭТМ от температур жидкости, окружающей среды и интенсивности СИ: а) КПД ФЭТМ; б) суммарный КПД ФЭТМ (3D); 1 – суммарный КПД; 2 – КПД тепловой части; 3 – КПД фотоэлектрической части модуля

Для сравнения данных математической модели с экспериментальными данными макета ФЭТМ была проведена серия испытаний. Аналитическое сравнение экспериментальных данных с математическими показало, что для ясных солнечных дней результаты оказываются близкими к экспериментальным. На рисунке 2.18 представлены результаты одного из дней проведённых натурных экспериментов вместе со смоделированными для данных условий показателями изменения температуры жидкости в резервуаре ФЭТМ. Расчетные результаты получены с учетом измеренных значений СИ, температуры окружающей среды и скорости ветра, мониторинг которых производился 20 сентября 2012 года (рисунки 3.22 и 3.24).

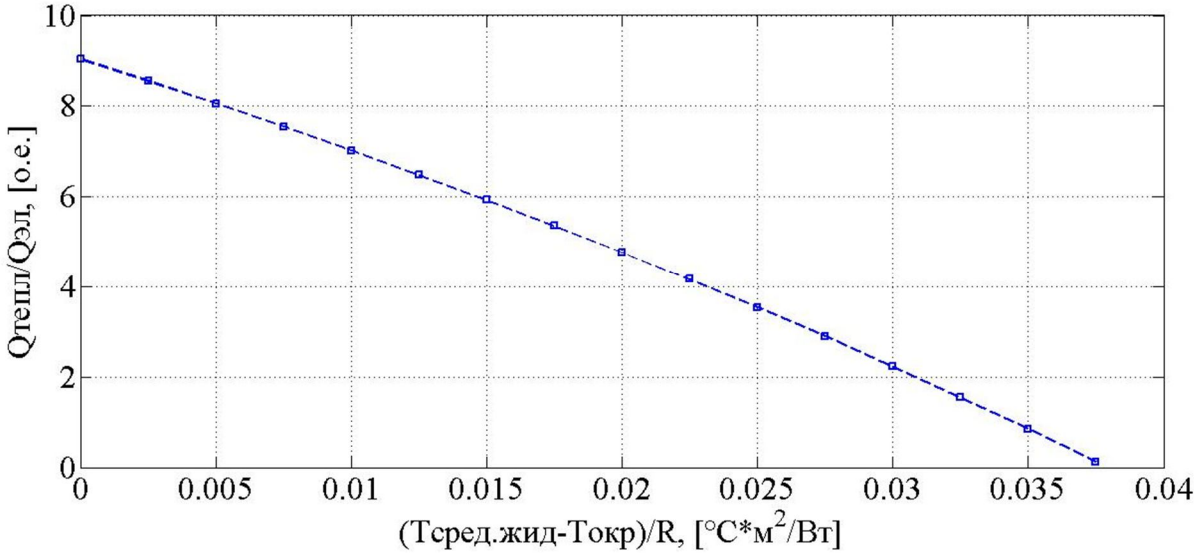


Рисунок 2.17 – Расчетные зависимости отношения произведенной тепловой энергии к электрической при различных температурах окружающей среды

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%.

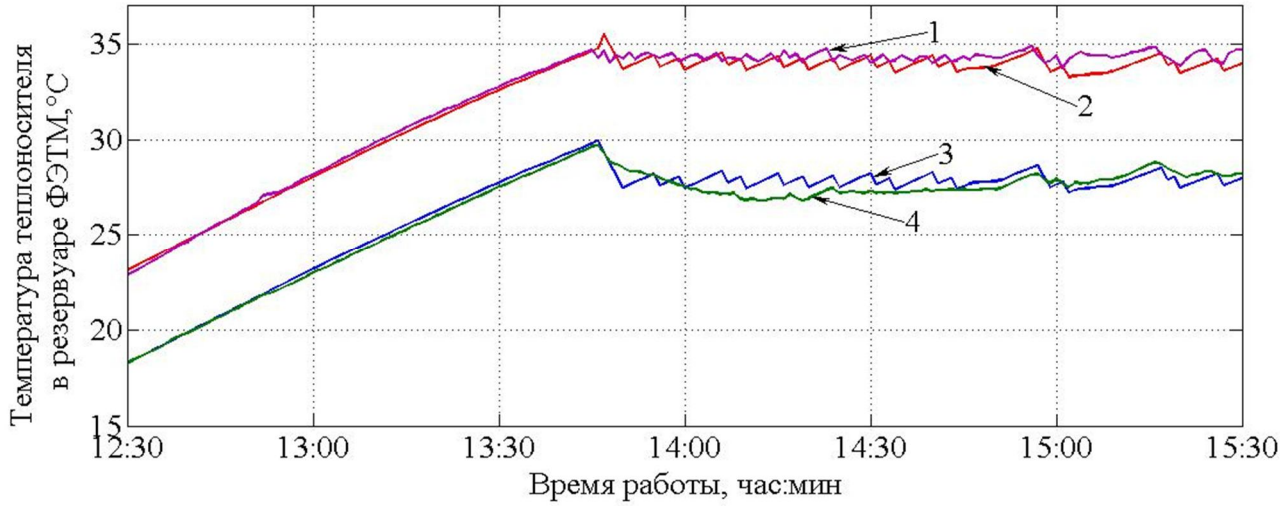


Рисунок 2.18 – Изменение температуры воды в резервуаре в период работы ФЭТМ: 1 – фактическая температура воды в верхних слоях; 2 – расчетная температура воды в верхних слоях; 3 – расчетная температура воды в средних слоях; 4 – фактическая температура воды в средних слоях

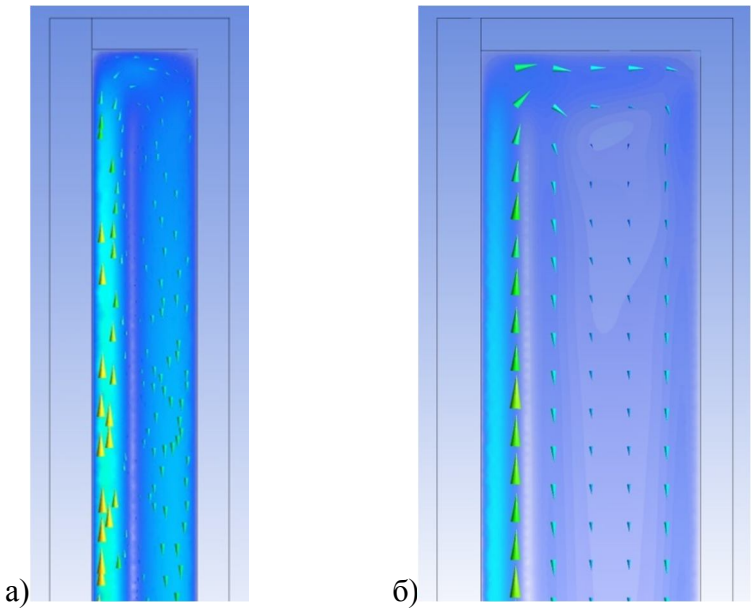
Натурные эксперименты показали возможность использования выражения (2.57) для описания процессов слива и залива жидкости в резервуар ФЭТМ для определенных дней (ясный и солнечный день) с постоянным расходом жидкости.

2.5.3 Обоснование толщины и высоты резервуара фотоэлектрического теплового модуля, работающего в составе разработанной технологической схемы

Основополагающим параметром, влияющим на характеристики ФЭТМ рассматриваемой конструкции, является толщина (расстояния от теплового абсорбера до противоположной параллельной ему тыльной стенки резервуара) и высота резервуара, рисунок 2.9. Поэтому были проведены теоретические исследования влияния этих параметров на эффективность работы ФЭТМ с помощью математической программы ANSYS [112].

Условия моделировании были следующими: интенсивность СИ постоянная и равна 1000 Вт/м^2, лучи СИ попадают перпендикулярно на тепловой абсорбер, расположение резервуара вертикальное, скорость ветра не учитывалась, потери от модуля приняты равными нулю, отсутствовали СЭ, размещенные на тепловом абсорбере. Высота исследуемого резервуара была принята 430 мм, с учетом высоты экспериментального макета ФЭТМ. Изучался нагрев воды с температуры 15°С до 35 °С [21].

Процессы, характеризующие поток жидкости внутри резервуара во время работы ФЭТМ (описанные в разделе 2.4), показаны на рисунке 2.19. Нагрев жидкости происходит с левой стороны стенки резервуара.



а) б)

Рисунок 2.19 – Конвективные процессы потока жидкости в верхней части резервуара толщиной 10 мм (а) и 20 мм (б) ФЭТМ (вид резервуара в поперечном вертикальном разрезе)

Одна из задач состояла в рассмотрении скоростей восходящего потока жидкости вдоль нагреваемой стенки (абсорбера) резервуара и противоположного ему нисходящего потока. Отметим, что скорость потока жидкости в резервуаре ФЭТМ является одним из основных факторов влияющих как на тепловую, так и на электрическую эффективность. На рисунке 2.20

показаны скорости жидкости в середине резервуара (на высоте 215 мм) при различной его толщине. Из рисунка можно выделить границу между восходящим и нисходящим потоком. Эта граница определяет толщину потока воды, отводящего тепло от нагретой стенки к жидкости, соответственно, чем шире этот поток и чем выше его скорость, тем больше тепловой энергии отводится от стенки к жидкости. Как можно видеть, при увеличении толщины резервуара растет восходящий слой жидкости, причем после толщины бака, равной 10 мм, рост становится не столь явным. Увеличение толщины резервуара отражается также и на росте скорости потока воды, причем зависимость изменения средней скорости восходящего потока воды в резервуаре при увеличении толщины нелинейная, и с ростом толщины бака средняя скорость стремится к определенному значению, рисунок 2.22 а.

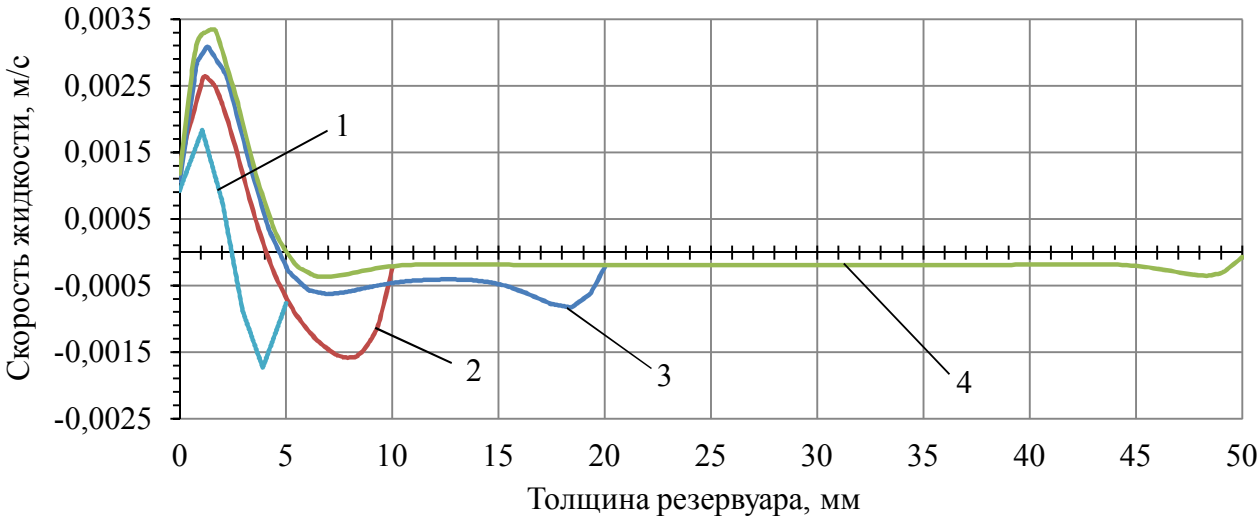


Рисунок 2.20 – Распределение скорости жидкости в резервуаре по толщине:
1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 50 мм

Другая задача состояла в рассмотрении вертикального распределения температуры теплового абсорбера ФЭТМ во время его нагрева, поскольку данный фактор является одним из основных, который влияет на эффективность выработки электричества СЭ.

При принятых выше условиях была смоделирована работа модуля с целью получения распределения температуры по высоте абсорбера ФЭТМ при различной толщине резервуара и достижении в верхнем слое жидкости температуры 35 °С (рисунок 2.21). При этом зависимость изменения средней температуры теплового абсорбера резервуара при увеличении толщины нелинейная и с ростом толщины бака стремится к определенному значению, рисунок 2.22 б).

Исходя из полученных данных, можно заключить, что увеличение толщины бака свыше 20 мм приводит к незначительному уменьшению средней температуры, но при этом существенно увеличивается время нагрева теплоносителя до 35 °С, что подтверждается и экспериментальными данными.

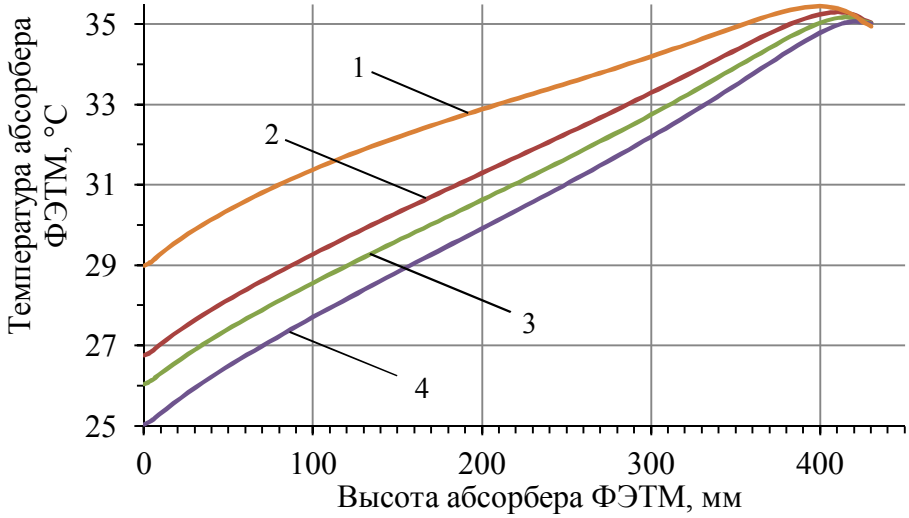


Рисунок 2.21 – Распределение температуры по высоте абсорбера ФЭТМ при толщине резервуара: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 –50 мм

На основании представленного анализа рекомендуется для ФЭТМ, входящих в состав разработанной солнечной когенерационной установки, использовать толщину резервуара 10 – 20 мм.

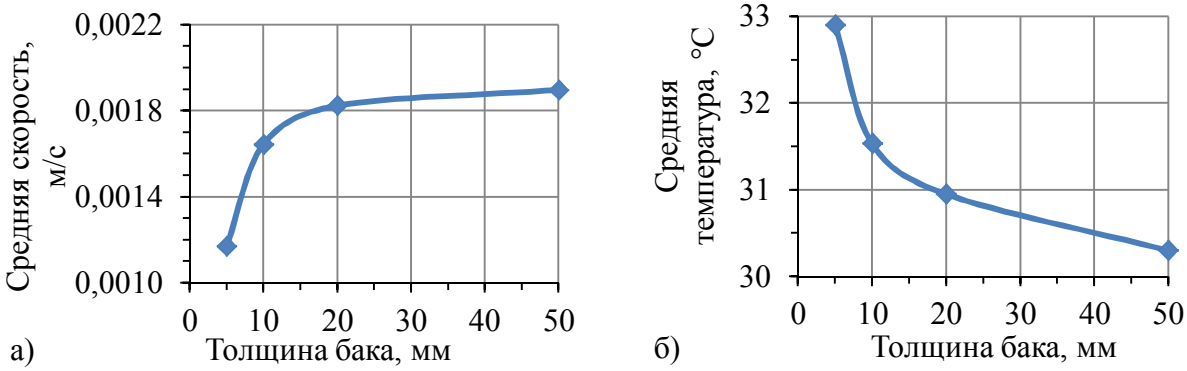


Рисунок 2.22 – Зависимость средней скорости восходящего потока воды (а) и средней температуры абсорбера (б) в резервуаре ФЭТМ от толщины резервуара

Отметим также особенности, связанные с высотой резервуара. В резервуаре толщиной 10 – 20 мм разность температур, приведенная на рисунке 2.21, составляет около 8,6 °С для высоты резервуара 430 мм. При увеличении данной высоты вдвое разность температур также должна увеличиться приблизительно в два раза и составить 17,2 °С, поскольку увеличивается путь нагрева теплового потока. Это подтверждается и экспериментальными данными. Т.е. высоту модуля в первом приближении можно принять пропорциональной разнице температур между верхней и нижней кромкой абсорбера. Тогда при высоте резервуара 1000 мм и нагреве воды до 35 °С температура в нижних слоях резервуара будет составлять около 15 °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 будет та же температура, что и у заливаемой воды (15 °С). Поэтому для описанного режима (нагрев воды с 15 до 35 °С) ФЭТМ, работающий по предлагаемой технологической схеме, должен иметь высоту свыше 1000 мм.

Очевидно, что вторым немаловажным фактором для определения необходимой высоты, обеспечивающей эффективную выработку фотоэлектричества ФЭТМ, является температура заливаемой жидкости, изменяющаяся в зависимости от сезона (весна, лето, осень) эксплуатации. При работе гелиоустановок с водяным теплоносителем производители рекомендуют прекращать работу установки при температуре окружающей среды + 3 °С. Тогда с учетом принятой пропорциональности, высота резервуара должна быть свыше 1600 мм для того, чтобы обеспечивалась эффективная работа ФЭТМ при технологической схеме с напорным баком (рисунок 2.6). При работе ФЭТМ по технологической схеме от водопровода высота модуля может быть ниже 1600 мм, и будет зависеть от температуры воды в водопроводе при температуре окружающей среды + 3 °С.

В действительности имеющиеся потери, угол наклона модуля и интенсивность СИ обеспечат несколько иную разницу температур и более точно оценить высоту модуля помогут экспериментальные исследования.

Анализ расчетов, проведенных с помощью программы ANSYS, показал, что правильно подобранные толщина и высота бака позволяют более эффективно использовать естественные физические процессы, протекающие в резервуаре ФЭТМ.

2.6 Механизм установки двухкоординатного слежения за положением солнца с одним электродвигателем

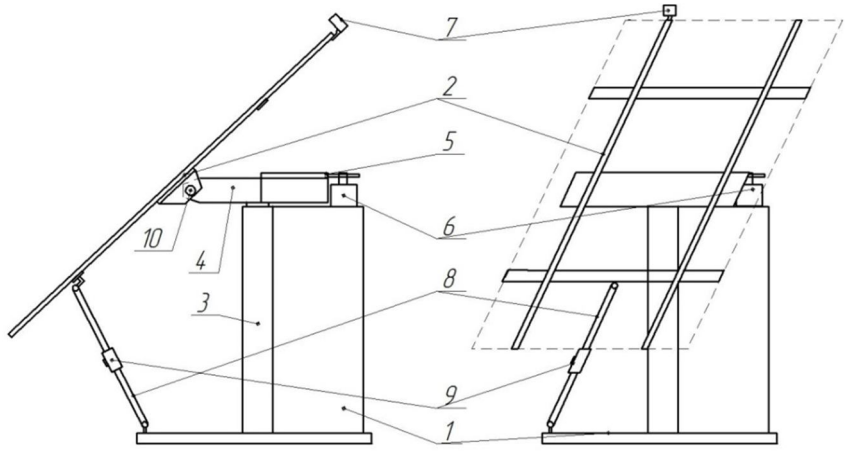
С точки зрения практического использования ФЭТУ прогнозируется недостаток в объеме вырабатываемой электрической энергии для нужд потребителя. Связано это с тем, что первоначально именно выработка тепловой энергии является преобладающей, и выбор площадей ФЭТМ и СК производится исходя из покрытия тепловой 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, следящих по одной оси, увеличивает эффективность отбора мощности на 30 %, по двум осям – на 40 % [113]. Установки двухкоординатного слежения обычно характеризуются наличием двух электродвигателей и вследствие этого сложной механической конструкцией и управляющим аппаратом. Поэтому была изобретена и запатентована установка

автоматического слежения приемной панели за солнцем [114]. Задачей установки является осуществление слежения за солнцем её приемной панели по азимутальным и зенитальным (угол возвышения) параметрам в течение светового дня с использованием одного электродвигателя. Общий вид установки представлен на рисунке 2.23.

Предлагаемая установка в качестве основных узлов содержит станину, поворотную раму обладающую возможностью азимутального движения, приемную панель, соединенную в средней части шарнирно с поворотной рамой, электродвигатель и др. (см. рисунок 2.23).

Рассмотрим подробнее работу установки (см. рисунки 2.23 и 2.24). 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 закрепленную с вертикальным валом, который шарнирно закреплен на станине. В зависимости от полярности напряжения за счет электродвигателя происходит изменение положения поворотной рамы по азимуту влево или вправо относительно оси *N*. К раме с помощью шарниров закреплена приемная панель, которая перемещается по азимуту совместно с рамой. В свою очередь панель за счет шарниров может перемещаться относительно оси *M*, изменяя, таким образом, свой угол наклона относительно горизонта.



а) б)

Рисунок 2.23 – Установка автоматического слежения приемной панели за солнцем:
а) положение приемной панели при максимальном угле возвышения солнца для данной местности; б) положение – при некотором отклонении угла возвышения солнца от максимума;
1 – станина; 2 – приемная панель; 3 – вертикальный вал; 4 – поворотная рама;
5 – редуктор; 6 – электродвигатель; 7 – датчик солнечной ориентации; 8 – стержень;
9 – регулятор длины стержня; 10 – шарнир

Во время процесса слежения при перемещении поворотной рамы по азимуту автоматически происходит поворот панели и по углу возвышения за счет изменения положения стержня, один конец которого связан шарнирно со станиной, а другой – с приемной панелью (рисунки 2.23, 2.24 и 2.25). Таким образом, происходит изменение положения приемной панели по углу возвышения относительно оси *M* и по азимуту относительно оси *N*.

Поворот приемной панели по азимуту осуществляется по радиусу *r* относительно оси *N*. Поворот по углу возвышения зависит от параметров *r, l, a, H, R,* где буквой *l* обозначается длина стержня. Прямая *a* лежит на плоскости панели и определяет расстояние от оси поворота *M* до крепления панели со стрежнем. *H* – это высота, на которой относительно нижнего конца стержня располагается поворотная рама. Буквой *R* обозначено расстояние от места крепления стержня со станиной до оси вращения *N*. Параметры установки рассчитаны таким образом, что при повороте рамы по азимуту обеспечивается необходимый поворот приемной панели по углу возвышения. Оптимально подобранные параметры обеспечивают необходимую точность слежения приемной панели установки.

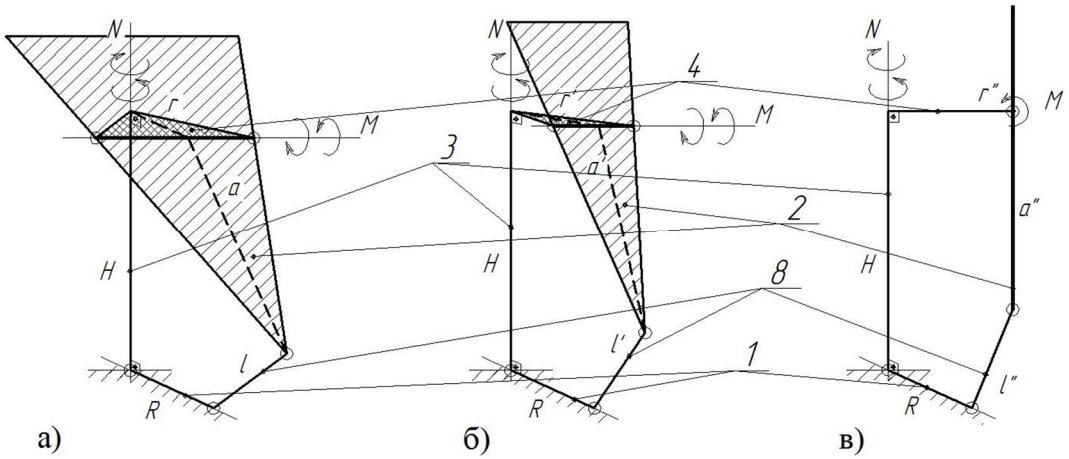


Рисунок 2.24 – Механика основных элементов конструкции установки:

а) вид, когда наблюдается максимальный угол возвышения солнца для данной местности;

б) вид при некотором отклонении угла возвышения солнца от максимума; в) вид при восходе солнца

Размеры элементов (*r, l, a, H, R*) рассчитываются индивидуально для каждой широты, где потенциально может использоваться установка согласно расчетным характерным зависимостям угла возвышения солнца над горизонтом на заданной широте в течение светового дня. Корректировка по зенитальному параметру положения приемной панели для различных дат года может быть обеспечена изменением длины стержня с помощью регулирующего узла (см. рисунки 2.23 и 2.25).

Положения приемной панели и поворотной рамы установки автоматического слежения за положением солнца в различный момент процесса работы показаны на рисунке 2.25.

На приемную панель установки могут монтироваться гелиоколлекторы, фотоэлектрические тепловые установки, фотоэлектрические модули и т. д.

В ВИЭСХе был создан макет такой установки слежения. На макете могут быть размещены ФЭМ с пиковой мощностью до 300 Вт. Слежение за положением солнца установка осуществляет от двигателя мощностью 120 Вт. Блок автоматического управления и датчик солнечной ориентации разрабатывались таким образом, чтобы установка осуществляла изменение приемной панели вместе с ФЭМ один раз в час. Изменение положения на 15 ° приемной панели обеспечивается работой двигателя в течение 3 сек.

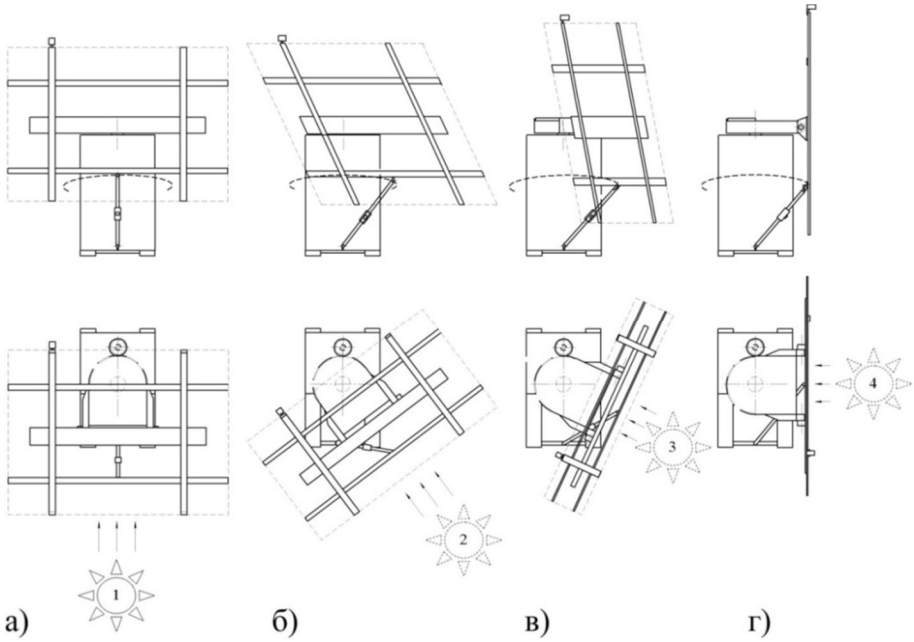


Рисунок 2.25 – Положения приемной панели установки (вид спереди и сверху):
а) при максимальном угле возвышения солнца для данной местности; б), в) при некотором отклонении солнца от максимума; г) при восходе солнца

Оценим потребление двигателя для дня весеннего равноденствия. При перемещении приемной панели за 3 сек потребляемая мощность двигателя с учетом пусковых токов составит около 480 Вт. Тогда в течение дня двигатель проработает 36 сек и затратит 4,8 Вт·ч электроэнергии, при возврате приемной панели потребление составит около 1,5 Вт·ч. Блок автоматического управления потребляет энергию на собственные нужды в течение суток равную 4 Вт·ч. Итого, в день равноденствия потребление электроэнергии установкой в сутки составит около 10, 3 Вт·ч. Выработка же даже в облачный день с установленными ФЭМ 300 Вт обычно превышает 600 Вт·ч. Тогда потребление на собственные нужды составит 1,72 % при выработке 600 Вт·ч. Как видим выработанная энергия даже в облачный день намного выше потребляемой установкой слежения функционирующей по предложенному механизму.

2.7 Использование ФЭТМ в составе комбинированной системы теплоснабжения на основе теплового насоса

Одной из стратегических задач сельской энергетики сегодня является снижение энергоемкости сельхозпроизводства на основе широкого использования новых прогрессивных технологий выработки и потребления энергетических ресурсов [115, 116, 117].

Эффективным средством организации теплоснабжения сельских жилых и производственных зданий может стать применение ТН. Перспективным представляется их использование в сочетании с системами на основе ВИЭ [36]. Среди ВИЭ предпочтительной к совместной работе с ТН выглядит солнечная энергия, которая позволяет производить как электрическую, так и тепловую энергию.

При совместном использовании ФЭТМ и ТН существенно повышается эффективность работы, как первой, так и второй установки, и как следствие всей системы в целом [98, 118, 119]. Блок-схема такой системы на основе ФЭТМ и ТН представлена на рисунке 2.26.

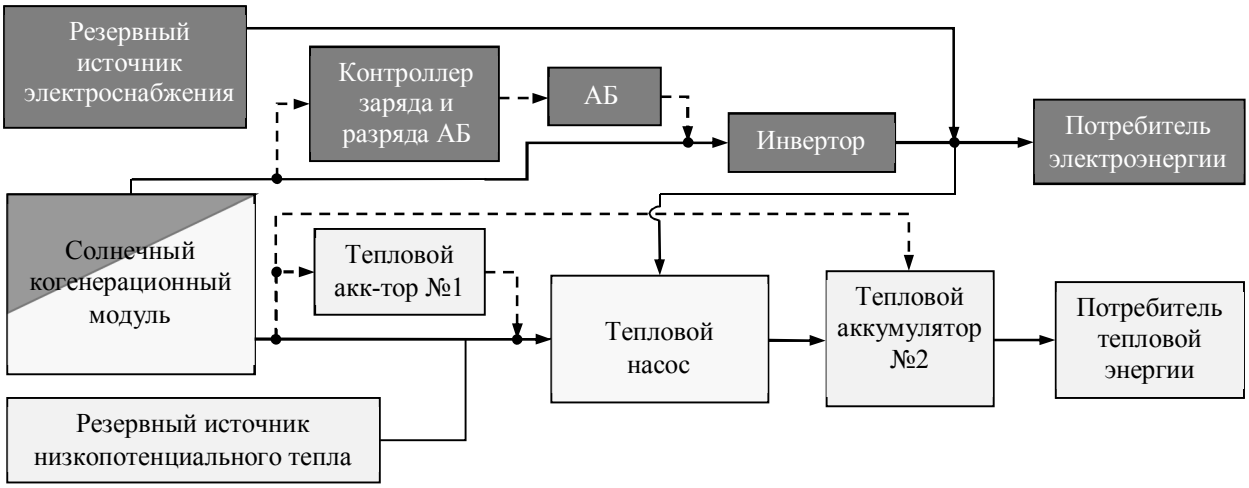


Рисунок 2.26 – Блок-схема комбинированной системы энергоснабжения на основе ФЭТМ и ТН (темные блоки относятся к электрической, а светлые к тепловой части системы)

Нагрев теплоносителя в системе происходит в две стадии, а разница между исходной, промежуточной и конечной (для потребителя) температурой распределяется между двумя установками. Для ФЭТМ уменьшение разности температуры нагрева теплоносителя повышает эффективность выработки как тепловой (см. рисунок 2.16), так и электрической энергии (см. рисунок 2.15), а кроме того и коэффициент отношения выработки тепловой энергии к электрической (см. рисунок 2.17). Для ТН уменьшение разности температуры нагрева теплоносителя также повышает его коэффициент трансформации (см. рисунок 2.27), а, следовательно, и его эффективность. Теплонасосные установки принято оценивать коэффициентом трансформации ($K_{тр}$) энергии. Это показатель эффективности, который численно

показывает количество полезного тепла, произведенного теплонасосной установкой на единицу затраченной электроэнергии.

В такой системе важно знать, насколько эффективно ФЭТМ может снабжать энергией ТН, поэтому рассмотрим работу комбинированной системы (рисунок 2.26) более подробней. При этом будем пренебрегать потерями энергии на передачу низкопотенциального тепла и электричества к ТН, потерями в теплообменных аппаратах, а также предполагать, что емкость аккумуляторов имеет значения близкие к бесконечности. Первоначально рассмотрим работу системы в автономном режиме, т.е. когда отсутствуют резервные источники тепла и электричества.

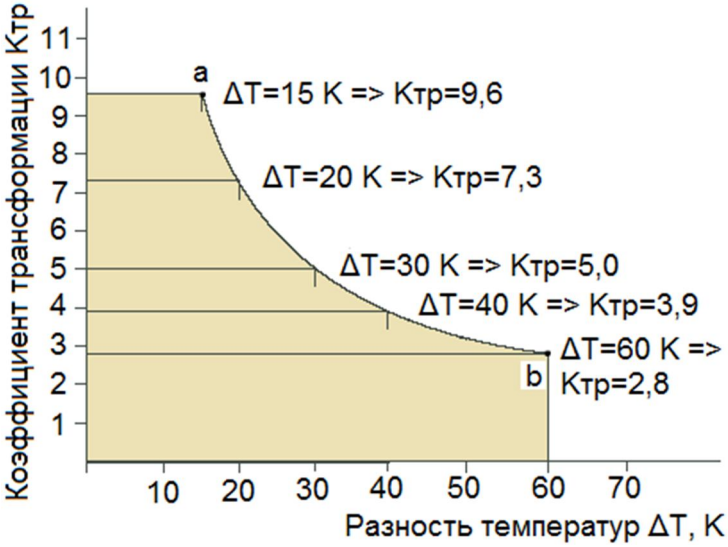


Рисунок 2.27 – Зависимость величины коэффициента трансформации энергии от разности температур наружного контура и контура отопления для типового компрессионного ТН [120]

На основе анализа представленных данных (см. рисунки 2.16, 2.17, 2.26, 2.27) можно сделать вывод, что работа системы по блок-схеме с учетом выше отмеченных ограничений может осуществляться в нескольких режимах. В первом, оптимальном случае модуль производит энергию $Q_{пол.тепл}$ и $Q_{эл}$ в соотношении, которое обеспечивает полное использование произведенной энергии в ТН. Т.е. будет выполняться равенство:

$$\frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{эл}} = K_{TP}. \tag{2.62}$$

Такой режим работы позволяет снизить требования на выбор емкости соответствующих накопителей энергии. Кроме того, точка равенства коэффициента отношения выработанной ФЭТМ тепловой энергии к электрической и коэффициента трансформации ТН, характеризует близкую к оптимальной тепловую эффективность всей системы (см. рисунок 2.28). Как можно видеть, данной эффективности соответствует оптимальная температура определяющая разность температур нагрева теплоносителя в ФЭТМ и ТН.

Уменьшение найденной таким образом оптимальной температуры приводит, с одной стороны, к увеличению тепловой выработки ФЭТМ, повышению его эффективности, однако с другой – уменьшению коэффициента трансформации ТН, а, значит, к ухудшению его эффективности. Возникающий при этом дисбаланс в объеме генерации энергии ФЭТМ с используемым объемом энергии ТН (в части тепловой и электрической энергии) требует компенсации одной энергии и накопления другой и, как следствие, приводит к необходимости дополнительных затрат, вызванных этим фактом.

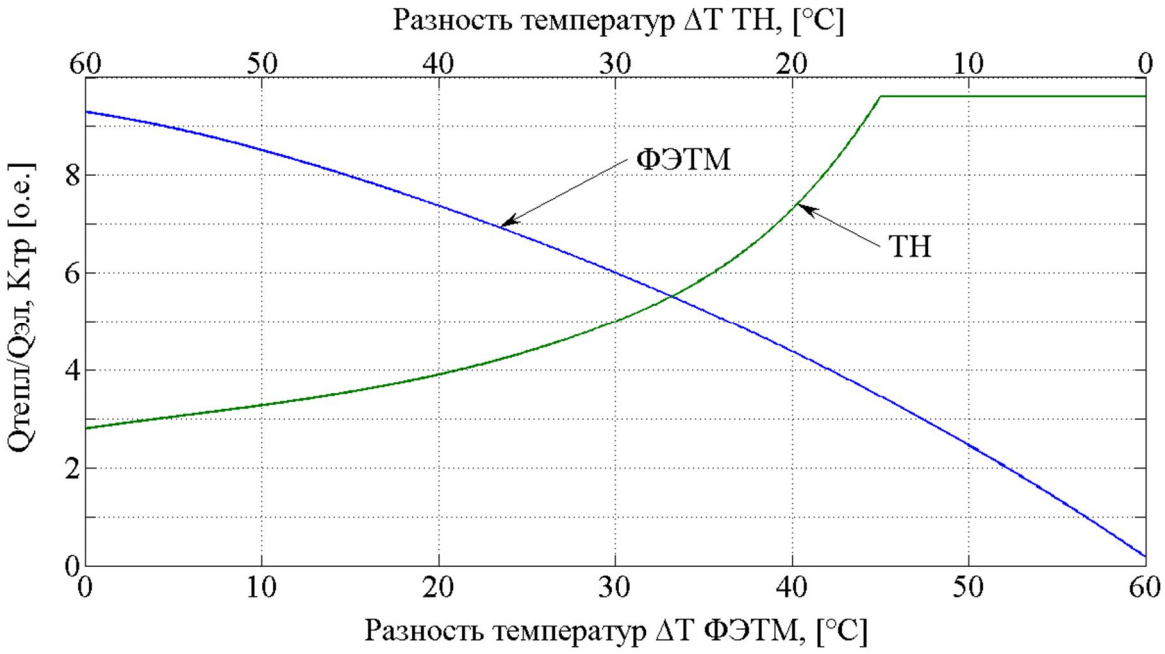


Рисунок 2.28 – Характеристики выработки ФЭТМ (1) и ТН (2)

Увеличение температуры нагрева ФЭТМ (см. рисунок 2.28) приводит к аналогичным процессам, с той лишь разницей, что эффективность ФЭТМ ухудшается, а ТН улучшается.

Стоит также отметить, что изменение требуемой разности температур (*ΔT)* нагрева теплоносителя комбинированной системой приводит к изменению оптимальной *ΔT* нагрева теплоносителя ФЭТМ (рисунки 2.28; 2.29) в силу нелинейности соответствующих характеристик ФЭТМ и ТН. Для примера оценим характеристики системы при нагреве теплоносителя на 60 ºС, при этом оптимальная разность температур определяющая нагрев теплоносителя на некоторую величину в ФЭТМ составит 33 ºС, соответственно, в ТН составит 27 ºС. А когда возникает необходимость нагрева теплоносителя системой на 40 ºС, то оптимальная разность температур в ФЭТМ составляет около 20 ºС, в ТН – 20 ºС (см. рисунки 2.28; 2.29).

Кроме того на отношение $Q_{пол.тепл}$ к $Q_{эл}$ в ФЭТМ влияют его текущие условия эксплуатации (интенсивность СИ, скорость ветра и др.), что соответственно сказывается на оптимальной разности нагрева им теплоносителя в системе с ТН.

Учитывая эти особенности, при текущих условиях эксплуатации ФЭТМ, зная исходную температуру теплоносителя и требуемую конечную, а, значит, необходимую разность нагрева, можно легко определить его оптимальную выходную температуру. Таким образом, при использовании предложенного подхода и разработанных средств, в процессе работы комбинированной системы автоматика, исходя из текущих условий эксплуатации, сможет определять текущую оптимальную температуру ФЭТМ и поддерживать при работе установки оптимальный режим, соответствующий условию (2.62).

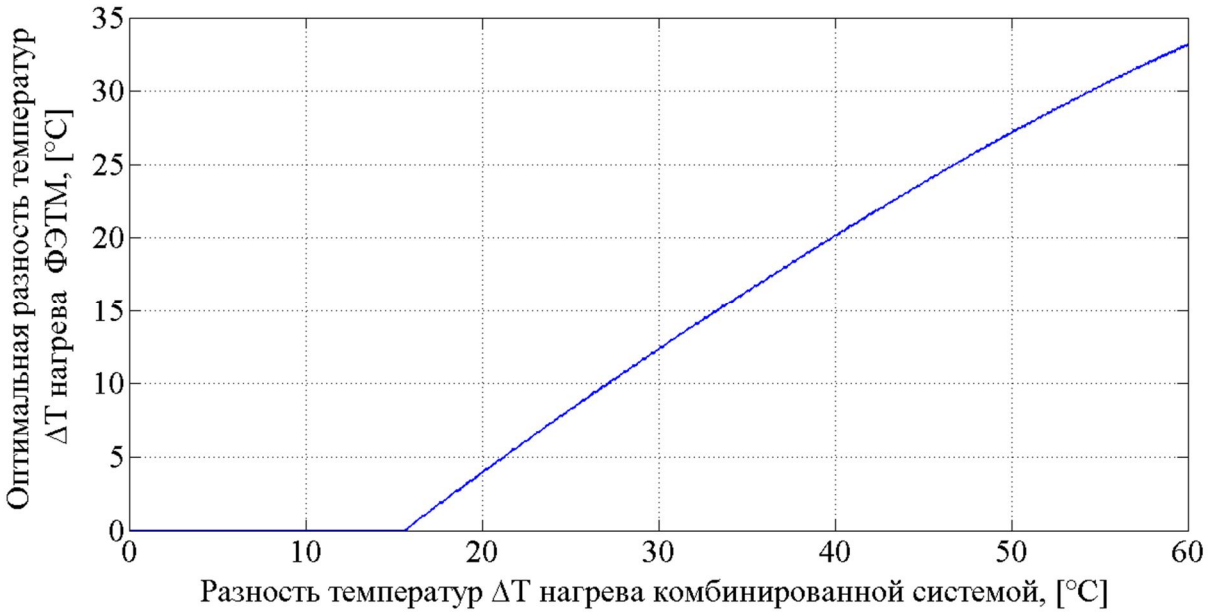


Рисунок 2.29 – Необходимая (оптимальная) разность температур нагрева теплоносителя ФЭТМ в зависимости от разности температур (начальной и конечной) теплоносителя комбинированной установки на основе ФЭТМ и ТН

Однако, в процессе работы комбинированной системы в силу большой инерционности процесса нагрева воды и различных внешних факторов будут возникать промежуточные режимы работы установки. В таких режимах будет возникать избыточная энергия, которая затем накапливается в аккумуляторах (см. рисунок 2.26).

Во втором режиме работы системы будет выполняться условие:

$$\frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{эл}} > K_{TP}. \tag{2.63}$$

В третьем режиме будет выполняться условие:

$$\frac{Q_{пол.тепл}}{Q_{эл}} < K_{TP}. \tag{2.64}$$

Если условия (2.63 и 2.64) рассмотреть с учетом критерия $Q_{эл} = Q_{комп.ТН}$ (т.е. вся сгенерированная ФЭТМ электроэнергия пойдет на работу компрессора ТН), то по условию

(2.63) наблюдается избыток низкопотенциальной тепловой энергии произведенной ФЭТМ, который может направляться в тепловой аккумулятор (см. рисунок 2.26). При условии (2.64) наблюдается дефицит низкопотенциальной тепловой энергии, необходимой для работы ТН, который может быть восполнен от теплового аккумулятора №1.

Рассмотрим вариант, когда условия (2.63 и 2.64) справедливы для критерия $Q_{пол.тепл} = Q_{ист.ТН}$, т.е. все произведенное тепло от ФЭТМ будет использовано в качестве источника низкопотенциального тепла на входе ТН. При режиме работы по условию (2.63) наблюдается дефицит в электроэнергии для компрессора ТН, который может быть восполнен от АБ (см. рисунок 2.26). В случае выполнения условия (2.64) наблюдается избыток электричества, который направляется для зарядки АБ.

Предпочтительной представляется работа системы по критерию $Q_{пол.тепл} = Q_{ист.ТН}$ из-за низкой удельной стоимости АБ и универсальности такого вида энергии как электричество.

Далее рассмотрим работу системы на основе ТН и ФЭТМ по блок-схеме с учетом резервных источников энергии (см. рисунок 2.26). Резервные источники обеспечивают гарантированное энергообеспечение потребителя, а с учетом непостоянства прихода СИ в большинстве вариантов необходимы для подобных систем. Режимы для ФЭТМ, работающего с ТН по условиям (2.62, 2.63, 2.64), будут справедливы и для текущей схемы работы. Только дефицит энергии будет восполнен либо от аккумулирующей системы, либо от резервных источников.

Рассмотренные характеристики эффективности ФЭТМ и ТН показывают потенциальные возможности повышения выработки как ФЭТМ, так и ТН. Можно отметить, что комбинация ФЭТМ с ТН помогает каждый Ватт приходящей СР использовать с максимальной эффективностью. Также такая комбинация снижает требования к конструкционным материалам ФЭТМ, увеличивает сезон работы ФЭТМ по сравнению с СК или когенерационными солнечными модулями, вырабатывающими высопотенциальное тепло. В климатических условиях большинства регионов Российской Федерации эти преимущества могут существенно повлиять на реализацию проектов комбинированной системы на основе ТН и ФЭТМ уже в скором будущем.

Показано, что в условиях, когда нет возможности преобразовывать всю произведенную ФЭТМ тепловую и электрическую энергию в ТН, лучше использовать режим, когда все произведенное модулем тепло используется в качестве низкопотенциального источника энергии.

2.8 Выводы по главе

1. Оценка распределения энергии в структуре ФЭ панели ФЭТМ показала существенный тепловой потенциал, а также влияние структуры СЭ на тепловую и электрическую эффективность модуля.

2. Были определены три основных режима функционирования ФЭТМ, работа в соответствии с которыми обеспечивает различную электрическую, тепловую и суммарную эффективность модуля. Предложена конструкция модуля, позволяющая работать в нескольких режимах в зависимости от нужд потребителя.

3. В разработанной гелиосистеме на основе ФЭТМ отсутствует циркуляционный насос, что снижает себестоимость и потребление электроэнергии на собственные нужды по сравнению с системой с принудительной циркуляцией жидкости. При этом схема работы установки такова, что отсутствие насоса не сказывается на эффективности фотоэлектрической части модуля.

4. Была разработана математическая модель ФЭТМ, обеспечивающая определение выработки тепловой и электрической энергии, а также получены основные характеристики эффективности макет ФЭТМ.

5. Обоснованы основные параметры конструкции (толщина должна составлять $10 \div 20$ мм; высота – $1600 \div 2000$ мм) и режимы работы ФЭТМ в соответствии с требованиями разработанной рабочей схемы установки.

6. Предложен механизм системы двухкоординатного слежения за положением солнца для ФЭМ и ФЭТМ, работающий от одного электродвигателя.

7. Рассмотрены режимы работы ФЭТМ в составе комбинированной системы с ТН. Отмечены положительные стороны такой комбинированной системы.

8. Существенно повышается эффективность ФЭТМ при использовании в существующей системе теплоснабжения, когда они обеспечивают предварительный подогрев теплоносителя, при этом сокращая энергетические затраты основного оборудования.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПЛОСКОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО МОДУЛЯ

При проведении экспериментальных исследований ФЭТМ важен источник излучения. Использование искусственных источников света при эксперименте позволяет проводить его в помещении и в любое время суток. Но при этом такие источники в разной степени соответствуют естественному СИ [94, 95].

Натурные эксперименты позволяют более качественно исследовать ФЭТМ и схему его функционирования, выявить проблемы и решить их на этапе научно-исследовательской работы, и тем самым подтвердить обоснованность теоретических положений. Именно поэтому основной массив экспериментальных данных был получен в натурных условиях.

Для проверки принятых научно-технических решений и сопоставления данных теоретических исследований с экспериментальными был разработан и изготовлен макет ФЭТМ. Макет ФЭТМ позволяет исследовать процессы, происходящие в различных структурах ФЭТМ, с целью оценки его работы и определения основных его параметров.

3.1 Конструкция экспериментального образца гелиоустановки на основе фотоэлектрического теплового модуля

Отметим, что некоторые особенности и характеристики элементов конструкции макета ФЭТМ были отмечены при описании математической модели (раздел 2.5), поскольку она создана на основе реального макета модуля. Одним из основных элементов макета ФЭТМ является резервуар для жидкости, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, на лицевой (освещаемой) стороне которого расположена фотоэлектрическая панель (рисунки 2.9, 3.1) [121]. Основные технические характеристик макета ФЭТМ приведены в таблице 3.1.

Фотоэлектрическая часть (панель) экспериментального ФЭТМ выполнена из 36 монокристаллических СЭ, соединенных в 4 группы по 9 СЭ каждая, образуя таким образом четыре ряда батарей СЭ (см. рисунок 2.9). Ряды СЭ расположены на разном расстоянии от основания модуля, что дает возможность изучать отдельно каждый ряд. Выходные контакты от каждого из четырех рядов выведены на отдельную плату, где предусмотрена их коммутация с возможностью образовывать единую батарею.

Залив жидкости в резервуар осуществляется с помощью патрубка 10, расположенного у основания экспериментального ФЭТМ, а слив с помощью патрубка 2, расположенного в верхней части модуля. При проведении экспериментов на входе в патрубок 10 располагался

электромагнитный клапан (рисунок 3.2), контролирующий поток жидкости через контур установки.

Таблица 3.1 – Технические характеристики экспериментального образца ФЭТМ

Параметр	*Ед.изм.*	*Значение*
Электрическая мощность при температуре ФЭП 35 ºС и интенсивности СИ 850 Вт/м^2	Вт	10,23
Номинальная тепловая мощность при производстве теплоносителя с температурой 35 ºС, температуре окружающего воздуха 20 ºС и интенсивности СИ 850 Вт/м^2	Вт	207
Напряжение при P_{max} и интенсивности СИ 850 Вт/м^2	В	11,88
Ток при P_{max} и интенсивности СИ 850 Вт/м^2	А	0,86
Количество СЭ	шт.	36
Габаритные размеры ФЭТМ	мм	1000×480×104
Площадь СЭ	м^2	0,282
Площадь фотоприемника	м^2	0,414
Материал абсорбера		сталь

Теплоизоляция модуля, как ранее отмечалось, состоит из двух уровней. Для первого уровня, изолирующего боковую и тыльную поверхности модуля, использован листовой вспененный полиэтилен с полированной алюминиевой фольгой. Второй уровень (внешний) состоит из двух материалов, изолирующих тыльную и боковую поверхности модуля (см. рисунок 2.9). Тыльная сторона покрыта поливинилхлоридной панелью типа «сэндвич» с наполнителем из вспененного пенополистирола. Боковая поверхность покрыта деревом. Образующая деревянная рама выполняет также функцию несущей конструкции, придающей жесткость модулю.

Рисунок 3.1 – Фотография исследуемого экспериментального макета ФЭТМ

СК представляет собой прямоугольный резервуар, однако, в отличие от ФЭТМ, он выполнен из алюминиевых листов толщиной 1 мм укреплённых внутри стяжками,

предотвращающими деформацию резервуара под действием жидкости. Теплоизоляция СК аналогична ФЭТМ, остекление несъемное (стационарное).

Рисунок 3.2 – Фотография электромагнитного клапана макета установки

На рисунке 3.3 представлен макет солнечной когенерационной установки созданный на основе описанных выше ФЭТМ и СК, функционирующих согласно разработанной технологической схеме (раздел 2.4).

Рисунок 3.3 – Фотография экспериментального образца установки на основе ФЭТМ

3.2 Способ оценки производства электроэнергии фотоэлектрической панелью фотоэлектрического теплового модуля

В гелиоустановках наблюдается неравномерное распределение температуры по их рабочим поверхностям, что связано с особенностями конструкции и потоками жидкости. Поэтому СЭ фотоэлектрической панели ФЭТМ имеют различную температуру в разных его частях. С учетом конструкции разработанного экспериментального образца ФЭТМ основная неравномерность температуры его ФЭ панели будет наблюдаться в вертикальном направлении, а ряды СЭ (см. рисунок 2.9) будут иметь разную температуру, а значит разную эффективность и производительность. Поэтому при натурных исследованиях становится важным знать характеристики отдельных рядов (групп, занимающих различные положения относительно вертикальной оси), составляющих фотоэлектрическую панель ФЭТМ. Такая необходимость приводит к тому, что при испытаниях экспериментального образца ФЭТМ требуется одновременно исследовать электрические параметры нескольких рядов с напряжением от 5 В до 36 В. Это, в свою очередь, связано с трудностями, первая из которых определяется подбором нужного аккумулятора, а вторая подбором контроллера заряда, который для адекватности и точности исследований должен иметь функцию отбора максимальной мощности. На сегодняшний день таких контроллеров (на напряжение 5 В) нет в продаже, поэтому для измерения электрической энергии СЭ ФЭТМ был выработан другой способ. В основе данного способа лежит выражение для определения эффективности СЭ и ФЭ панели при стандартных условиях:

$$КПД = \frac{P_{max}}{R \cdot F_{пр.фэ}} = \frac{U_{XX} \cdot I_{КЗ} \cdot FF}{R \cdot F_{пр.фэ}}, \quad (3.1)$$

где R – интенсивность СИ, Вт/м^2;

$F_{пр.фэ}$ – площадь поверхности СЭ ФЭ панели, м^2;

U_{XX} – напряжения холостого хода, В;

$I_{КЗ}$ – тока короткого замыкания, А;

FF – фил-фактора, о.е.

Выражение, записанное в числителе уравнения (3.1) может быть использовано для оценки производимой электрической энергии.

$$W_{ФЭ} = P_{ФЭ} \cdot t = U_{XX} \cdot I_{КЗ} \cdot FF \cdot t, \quad (3.2)$$

где t – время, с.

Как уже было отмечено выше, появилась необходимость разработать способ мониторинга выработки потенциальной электроэнергии ФЭ панелью с различным рабочим напряжением, при этом немаловажным фактором стала также стоимость метода. Для этого

была разработана методика на основе уравнения (3.2), и создано технологическое оборудование, позволяющее определять потенциальную выработку как СЭ, так и ФЭ панелей в лабораторных и, главное, в натурных условиях.

Специализированное оборудование, используемое для определения потенциальной производительности, будет описано разделом ниже. Один из его блоков фиксирует показания U_{xx} и $I_{кз}$ ФЭ панели или ее рядов в период работы. Фил-фактор ФЭ панели определяется расчетным путем. Параметрами, влияющими на изменение значения фил-фактора, являются в основном температура и интенсивность СИ. Влияние температуры рассчитывается исходя из зависимостей U_{xx}, $I_{кз}$, P_{max}, (см. рисунок 1.5), влияние интенсивности СИ незначительно [92], поэтому им можно пренебречь. Далее, с учетом измеренных параметров и расчетного *FF*, программное обеспечение по уравнению (3.2) высчитывает производимую потенциальную электрическую энергию исследуемой фотоэлектрической панели.

К несомненному преимуществу данного способа, с помощью которого осуществляется мониторинг потенциальной производительности работы СЭ, стоит отнести возможность определения потенциальной выработки в зависимости от *FF* батареи. Поскольку последний сильно зависит от качества используемых СЭ, то, оценив динамику и эффективность работы одних (невысокого качества) СЭ, можно спрогнозировать эффективность других СЭ (с другим *FF*).

Данный способ также позволяет оценить работу ФЭ панели при подключении ее к нагрузке с различным сопротивлением. Это важно при оценке работы ФЭ панели с АБ разной емкости, нагрузка которых в процессе зарядки, как известно, меняется.

Имея данные в динамике, благодаря разработанному устройству мониторинга, появляется возможность определять в той же динамике производительность работы фотоэлектрической панели ФЭТМ, производя качественную оценку работы СЭ.

3.3 Разработка комплекса мониторинга основных параметров гелиоустановок с фотопреобразователями

При проведении натурных исследований экспериментального образца ФЭТМ и СК необходимо было обеспечить точность и сопоставимость получаемых результатов, а также адекватную их интерпретацию, для чего желательно отслеживать процессы в динамике. В связи с этим была создана система мониторинга интенсивности СИ в процессе натурных исследований [122]. С учетом необходимости мониторинга дополнительных параметров гелиоустановки в процессе её натурных испытаний, созданная система была модернизирована [123, 124].

Показания интенсивности СИ в модернизированной системе фиксируются с помощью двух пиранометров: «ПЕЛЕНГ СФ-06» фирмы ОАО «Пеленг» (Республика Беларусь) и «GSM/O-I10» фирмы «FuehlerSysteme» (Германия) (рисунок 3.4). Использование двух пиранометров позволяет одновременно оценивать плотность потока суммарной и рассеянной или прямой солнечной радиации. Сопряжение пиранометра «GSM/O-I10» с компьютером обеспечивается с помощью коммутационного блока пиранометра и устройства сбора данных (УСД) *NI* USB *6008* [125] (рисунок 3.5). Обработка, вывод данных и их хранение осуществляются с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое было написано на языке графического программирования LabVIEW.

а) б)

Рисунок 3.4 – Пиранометры, входящие в состав измерительной системы:
а) пиранометр «ПЕЛЕНГ СФ-06»; б) пиранометр «GSM/O-I10»

Поток СИ, поступающий к поверхности приемника, зачастую непостоянен из-за воздействия ряда факторов (облачность, запыленность и загазованность атмосферы и др.), что приводит к тому, что СЭ установки в течение дня работают в разных температурных условиях. Поэтому важно иметь данные по температуре этих узлов в динамике. В качестве датчиков температуры используются термопреобразователи сопротивления медные ТСМ- 50, 100, подключенные к восьмиканальному универсальному измерительному модулю ввода аналоговому (МВА-8) фирмы ОВЕН (см. рисунок 3.5) [126]. К этому измерительному модулю также подключается и пиранометр «ПЕЛЕНГ СФ-06». Подключение МВА-8 к персональному компьютеру производится через адаптер ОВЕН АС3-М или АС4.

При проведении натурных исследований солнечных модулей зачастую сложно оперативно определять некоторые параметры, к примеру, вольт-амперные характеристики. По

этой причине измеряются другие величины, также определяющие фотоэлектрические параметры, такие как напряжение холостого хода U_{XX} и ток короткого замыкания I_{K3}.

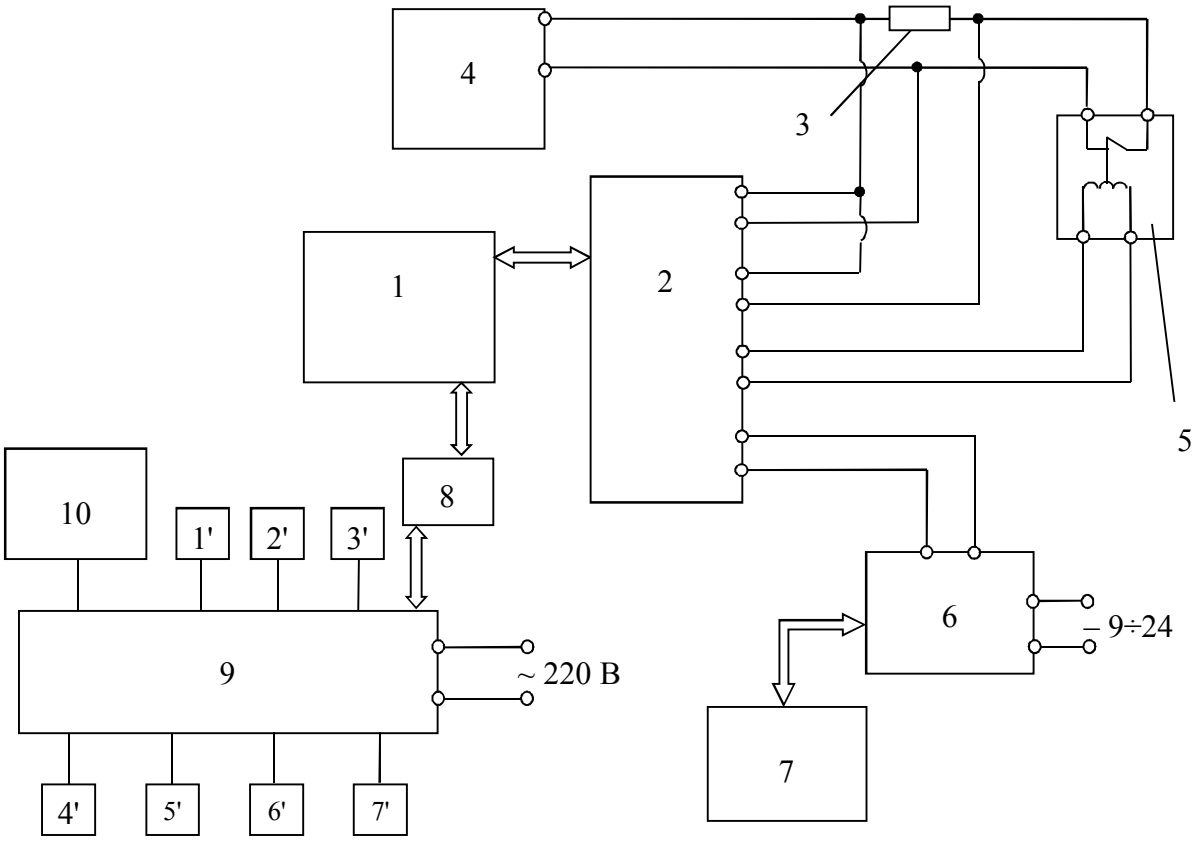


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема системы мониторинга:
1 – персональный компьютер; 2 – устройство сбора данных *NI USB 6008*;
3 – резистор; 4 – солнечная батарея; 5 – реле; 6 – блок коммутации пиранометра *GSM*;
7 – пиранометр *GSM/O-I10*; 8 – адаптер ОВЕН *AC3-M*; 9 – модуль ввода аналоговый *MBA-8*;
10 – пиранометр «*ПЕЛЕНГ СФ-06*»; 11 – 1', 2', 3'…7' - датчики температуры

Их мониторинг выполняется с помощью специализированного устройства определения потенциальной электрической выработки на основе уже упомянутого выше блока *NI* USB 6008. Данный блок представляет собой микроконтроллер, осуществляющий коммутацию с персональным компьютером через аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи. На принципиальной схеме, изображенной на рисунке 3.5, к *USB 6008* подключается резистор 3, предназначенный для измерения тока в схеме. Ток в цепи определяется расчетным путем по результатам измерения напряжения на отмеченном резисторе 3. Таким образом, U_{XX} ФЭ панели измеряется непосредственно устройством *USB 6008*, а I_{K3} определяется через резистор 3 согласно закону Ома.

Постоянное измерение U_{XX} и I_{K3} во время работы установки осуществляется благодаря установленному в измерительной цепи реле 5, которое попеременно создает в цепи режимы

холостого хода и короткого замыкания (см. рисунок 3.5). Управление работой реле 5 осуществляется программно от *USB 6008*.

Синхронизация *USB 6008* с персональным компьютером происходит через USB порт. Для устройства определения потенциальной выработки, также как и для пиранометра «GSM/O-I10», было написано программное обеспечение на языке графического программирования LabVIEW со следующими функциями: управления элементами цепи, обработки, вывода, записи и хранения данных. Количество точек снятия измеряемых параметров регулируется программным путем. На рисунке 3.6 представлена фотография, отражающая процесс вывода информации по измеряемым параметрам во время натурных исследований разработанного макета гелиоустановки. На мониторе справа представлен интерфейс устройства, осуществляющего мониторинг U_{XX} и I_{K3}.

Единая принципиальная схема специализированной программно-аппаратной системы мониторинга основных параметров гелиоустановки с ФЭП представлена на рисунке 3.5. Такая система позволяет нам получать основную информацию о состоянии гелиоустановки в динамике (температуре основных узлов установки, напряжении холостого хода и токе короткого замыкания) с учетом прихода солнечной энергии (показания пиранометров) [127].

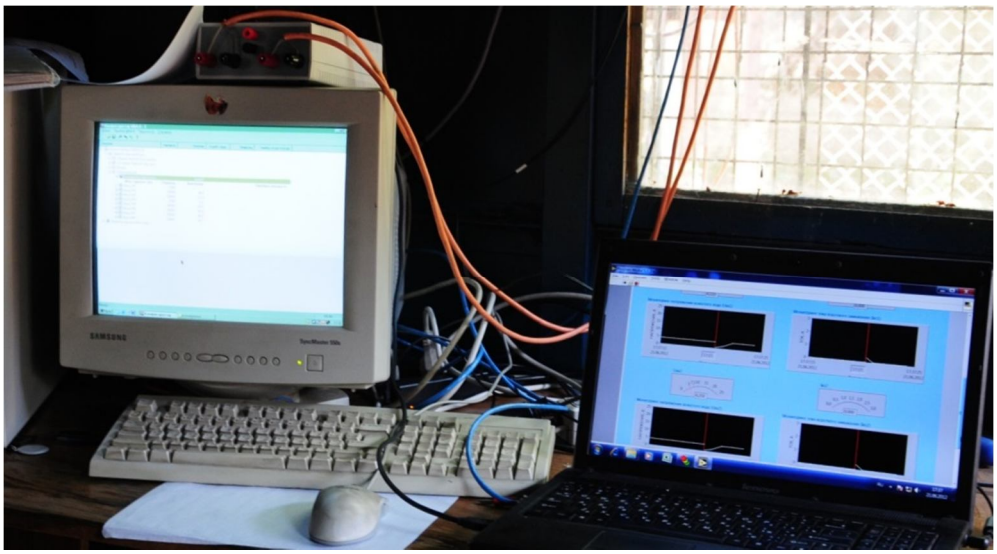


Рисунок 3.6 – Индикация измеряемых параметров при исследовании макета гелиоустановки на основе ФЭТМ и СК

При исследованиях вместе с рассмотренными выше устройствами мониторинга также применялась автоматизированная информационно-измерительная система [128, 129]. Она была разработана для постоянного мониторинга метеопараметров, а также величин тепловой и электрической энергии, вырабатываемой и потребляемой в системе энергоснабжения. Данная система применялась для измерения следующих величин: скорости и направления ветра, температуры окружающей среды, температуры в некоторых узлах экспериментального модуля.

Представленные системы автоматического измерения метеопараметров и измерения параметров гелиоустановок с фотопреобразователями представляют собой комплекс мониторинга, позволяющий не только экономить время при обработке информации, но и получать более достоверную информацию о динамике протекающих процессов. Диапазон измерения и точность приборов входящих в состав комплекса представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Диапазон измерения и точность приборов входящих в состав измерительного комплекса

Наименование прибора	*Измеряемый параметр*	*Диапазон измерения*	*Точность измерения*
Пиранометр Пеленг СФ-06	Солнечная радиация	10 ÷ 1600 Вт/м^2	2 %
Пиранометр GSM/O-I10	Солнечная радиация	0 ÷ 1300 Вт/м^2	10 %
Анемометра Davis 7911	Скорость ветра	1...68 м/с	5 %
Датчики температуры	Температура	– 50 ÷ 150 °С	+/–1 °С
УСД *NI* USB 6008	Напряжение холостого хода	– 20 ÷ 20 В	0,5 %
	Ток короткого замыкания	0 ÷ 2,5 А	1,5 %
Универсальный измерительный МВА-8	Температура	–	0,25 %
	Солнечная радиация	–	0,25 %

Такой комплекс обеспечивает возможность получать более точную информацию о поведении гелиоустановки в процессе работы и на качественно новом уровне проводить оценку её параметров.

3.4 Описание натурных исследований экспериментального образца фотоэлектрического теплового модуля

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.

Макет ФЭТМ был установлен стационарно и ориентирован на юг, угол наклона приемной панели соответствовал её ориентации перпендикулярно солнечным лучам в полдень.

Показания датчиков (температуры, скорости ветра) фиксировались комплексом мониторинга с интервалом 30 - 60 секунд, показания пиранометров – с интервалом 25 секунд, показания устройства измерения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания – с интервалом 5 секунд (если отдельные значения записи данных не указаны для конкретного периода времени проведения эксперимента).

В составе системы автоматики (см. раздел 2.4) использовались электромагнитный водопроводный клапан NT8048 и цифровой контроллер температуры BM 945F, работающие на постоянном токе напряжением 12 В и потребляющие 5 Вт и 0,84 Вт, соответственно [130].

На первом этапе исследований были изучены процессы нагрева различных элементов ФЭТМ и жидкости в нем до начала момента слива. При проведении описанных исследований схема работы установки была изменена, путем исключения из нее СК (рисунок 3.7).

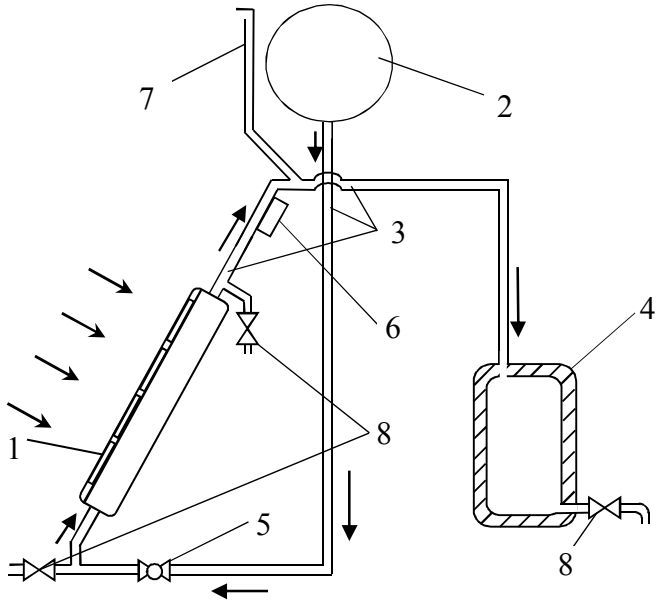


Рисунок 3.7 – Схема работы экспериментального ФЭТМ:
1 – ФЭТМ; 2 – напорный бак; 3 – трубопровод; 4 – бак-аккумулятор;
5 – электромагнитный клапан; 6 – термореле; 7 – воздушник; 8 – вентиль

Второй этап исследований заключался в сравнении характеристик ФЭТМ при его работе в двух положениях. Первое положение предполагало продольное (рисунки 2.9 и 3.8), а второе – поперечное (рисунок 1.3) вдоль горизонта размещение модуля относительно его длины.

Следующий, третий этап, включал в себя исследования ФЭТМ в составе солнечной когенерационной установки, функционирующей согласно основной разработанной схеме (рисунок 3.3). Подробно состав и работа установки были описаны в разделе 2.4.

Во время проведения всех экспериментов измерения основных параметров макета ФЭТМ производились с помощью контрольного комплекса мониторинга основных параметров

гелиоустановок с ФЭП, подробно описанного выше. На рисунке 3.8 представлены места установки датчиков температуры на макете ФЭТМ в зависимости от этапа исследований. Датчики также располагались в СК, в напорном баке, а датчик, фиксирующий температуру окружающей среды, и датчик скорости ветра располагались вблизи ФЭТМ.

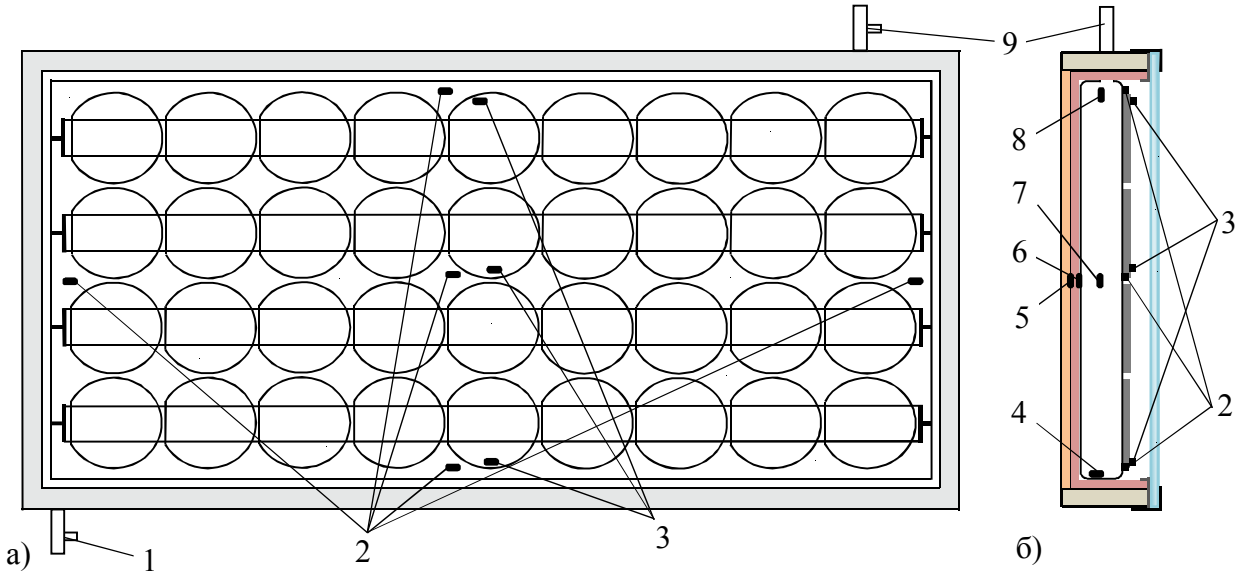


Рисунок 3.8 – Места расположения датчиков температуры в макете ФЭТМ:
а) вид модуля сверху, б) вид в разрезе; 1 и 9 – на входных и выходных патрубках;
2 – на рабочей поверхности абсорбера; 3 – на рабочей поверхности СЭ; 4 – на дне резервуара;
5 – на границе двух типов теплоизоляции; 6 – на внешней тыльной стороне резервуара;
7 – в середине резервуара; 8 – вверху резервуара

Следует отметить, что при описании экспериментов температура теплоносителя в средних слоях фиксируется по датчику 7 (см. рисунок 3.8), температура теплоносителя в нижних и верхних слоях – по датчикам 4 и 8.

3.5 Результаты натурных исследований экспериментального образца ФЭТМ

3.5.1 Вольт-амперная характеристика фотоэлектрической панели ФЭТМ

Оценить реальную эффективность ФЭ панели экспериментального образца ФЭТМ позволяет снятая в натурных условиях ВАХ. В результате проведенных натурных измерений были получены ВАХ ФЭ панели ФЭТМ без стекла (рисунок 3.9) и ВАХ её отдельных 4 групп (рисунок 3.10) (каждая группа представляет собой ряд из 9 последовательно соединенных СЭ, см. рисунок 2.9).

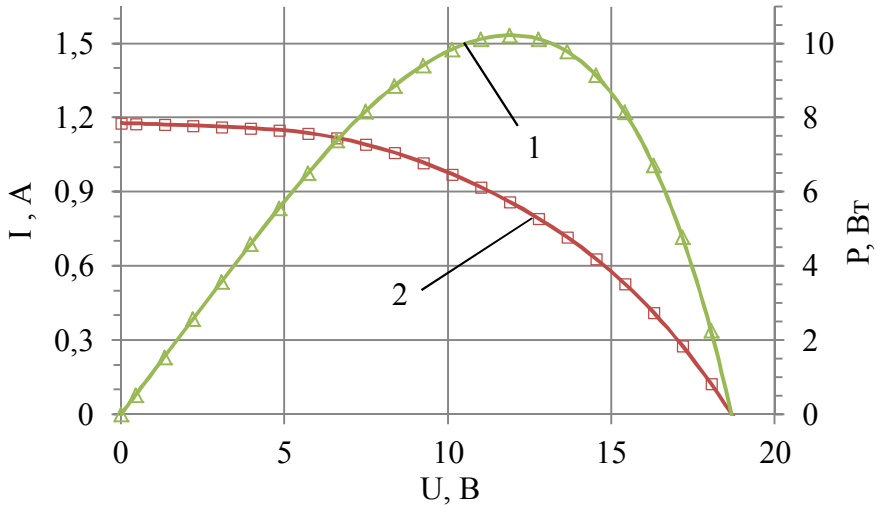


Рисунок 3.9 – Кривая мощности (1) и ВАХ (2) ФЭ панели ФЭТМ при интенсивности СИ 850 Вт/м^2 и рабочей температуре 35 ºС

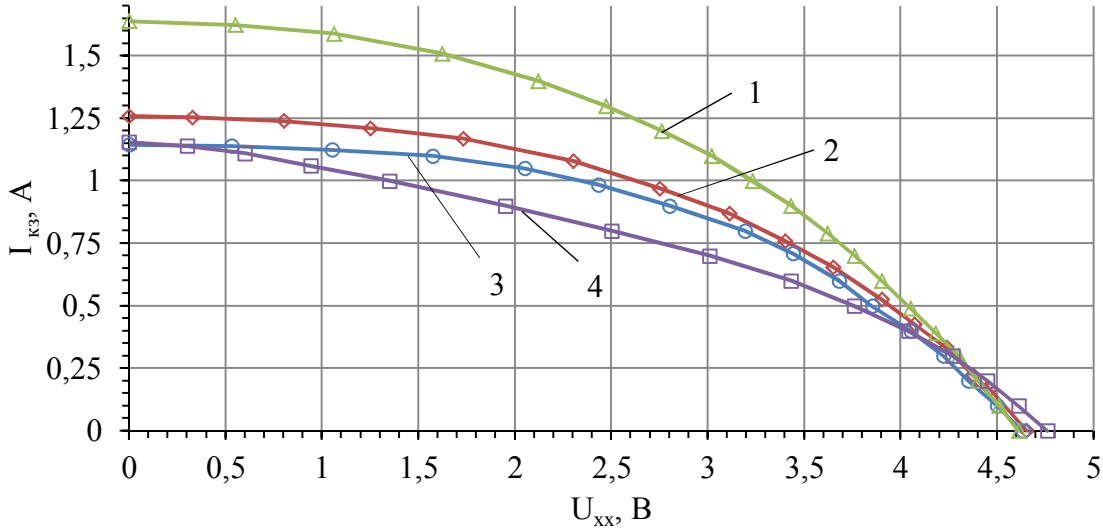


Рисунок 3.10 – ВАХ четырех составных групп ФЭ панели ФЭТМ при интенсивности СИ 850 Вт/м^2 и рабочей температуре 35 ºС: 1 – характеристика группы №3; 2 – характеристика группы №2; 3 – характеристика группы №1; 4 – характеристика группы №4

Математическая обработка результатов показала, что ФЭ панель при интенсивности СИ 850 Вт/м^2 и рабочей температуре 35 ºС имеет фил-фактор равный 0,46. При данных условиях пиковая мощность ФЭ панели ФЭТМ соответствует значению 10,23 Вт, а электрический КПД установки составляет 4,3 %. ФЭ панель имеет невысокое значение эффективности, но достаточное для изучения многих процессов, что позволило провести полный объем запланированных исследований.

3.5.2 Анализ нагрева различных элементов ФЭТМ

Рассмотрим первый этап исследований, который заключался в изучении процессов нагрева различных элементов ФЭТМ и жидкости в его резервуаре в ясную погоду. Согласно плану исследований циркуляция теплоносителя на первых этапах отсутствовала, модуль работал без остекления.

Исследование работы ФЭТМ в ясный день. Безоблачное небо наблюдалось 21.06.12. На рисунках 3.11 и 3.12 приведены данные мониторинга интенсивности СИ, ветра и параметров ФЭТМ в отмеченный день. В приложении А на рисунке А.1 приведены показания напряжения холостого хода и тока короткого замыкания ФЭ панели ФЭТМ.

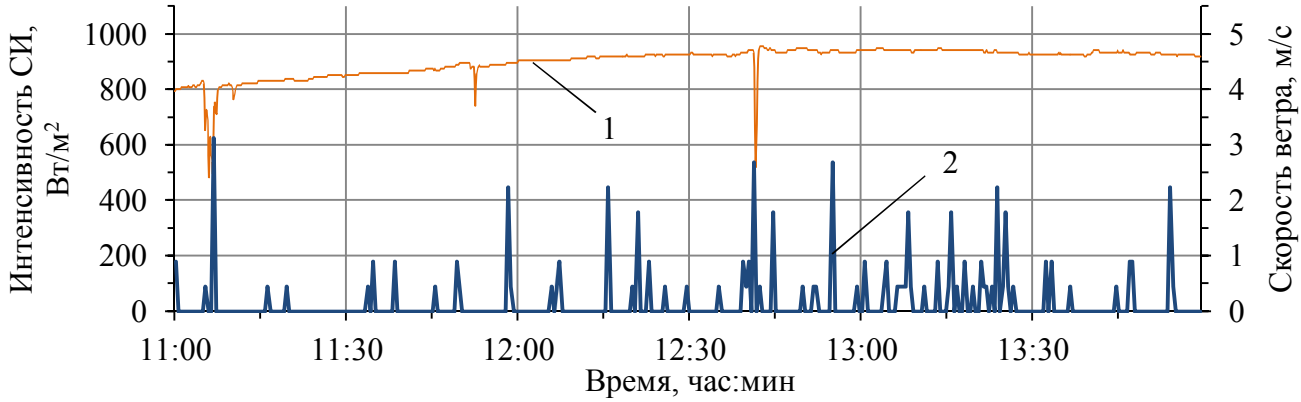


Рисунок 3.11 – Изменение интенсивности СИ (1) и скорости ветра (2)

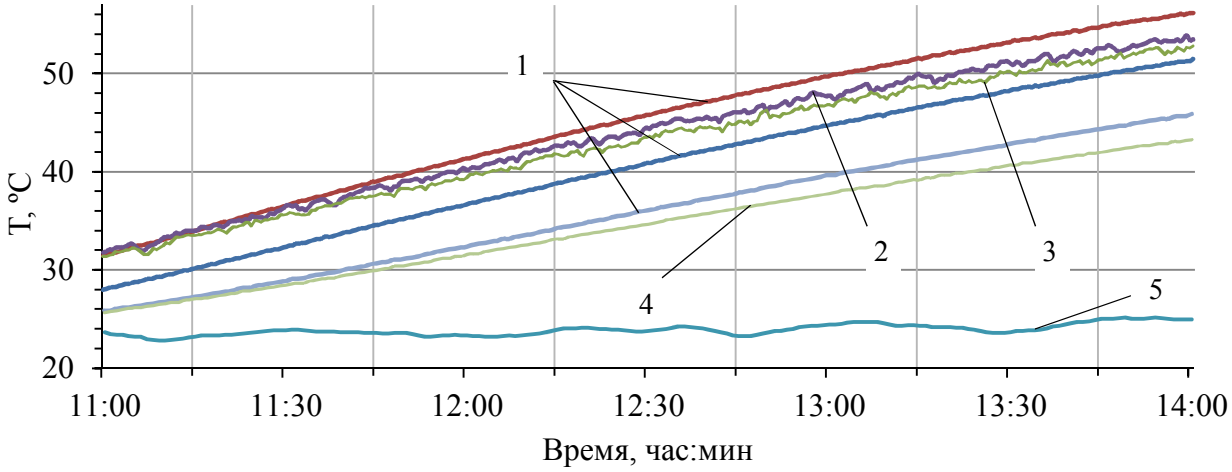


Рисунок 3.12 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТМ:

1 – температура (кривые сверху вниз) в верхних, средних и нижних слоях жидкости в резервуаре модуля; 2 – температура СЭ на высоте около 225 мм от нижней кромки абсорбера;

3 – температура абсорбера на высоте около 215 мм от нижней кромки абсорбера;

4 – температура участка на границе двух типов изоляции в середине высоты модуля;

5 – температура окружающего воздуха

В ясный солнечный день температура СЭ, как и ожидалось, зависит в основном от температуры нагреваемого теплоносителя. Изменение температуры теплоносителя и СЭ с течением времени имеет слабо выраженный логарифмический характер и, как показывают математические расчеты, зависит в основном от параметров материалов, используемых в конструкции ФЭТМ. Поэтому данные материалы и их параметры должны быть оптимально подобраны с учетом режима работы модулей.

Следует отметить, что характер наклона кривой температуры теплоносителя в различных слоях немного отличается друг от друга (рисунок 3.12), что связано с конвективными процессами жидкости, происходящими в резервуаре.

Результаты натурного эксперимента, представленные на рисунке 3.12, показали, что при температуре жидкости в верхнем слое 35 °С, температура в нижнем слое отличается на 7 °С, что было подтверждено в ряде экспериментов, проведенных также в ясную погоду. По теоретическим данным (представленным в разделе 2.5.3) разность температур равна 10 °С, но эта разность между верхней и нижней точками абсорбера, несоответствие данных также связано главным образом с неучётом тепловых потерь при математическом моделировании и с интенсивностью СИ в натурных условиях, несоответствующей 1000 Вт/м^2.

Особенность линейного изменения температуры абсорбера по высоте модуля предопределяет целесообразность последовательного соединения СЭ по горизонтальному направлению и дальнейшей параллельной коммутации полученных горизонтальных цепочек. Это позволит повысить общую эффективность выработки ФЭТМ электрической энергии, поскольку каждая из горизонтальных цепочек будет работать в одинаковых температурных условиях и не будет определяться наименьшим током СЭ из-за влияния температуры. При ограниченном размере абсорбера желательно подобрать такого размера СЭ, чтобы при последовательном соединении получить заданное напряжение цепочки.

При подключении СЭ в состав ФЭ панели ФЭТМ необходимо производить коммутацию с учетом их характеристик, типа соединения (параллельное или последовательное) и расположения на абсорбере модуля относительно высоты. К примеру, при параллельной коммутации горизонтальных цепочек СЭ располагать выше те из них, у которых характеристики по напряжению в зоне максимальной выработки электроэнергии имеют большее значение. А при последовательной коммутации горизонтальных цепочек СЭ, цепочки с высоким электрическим током в зоне максимальной выработки располагать ниже других.

Исследование работы ФЭТМ в малооблачный день. Результаты натурных экспериментов ФЭТМ, проведённых 22.06.2012 без остекления и 27.07.2012 с остеклением, представлены на рисунках 3.13 и 3.14, соответственно.

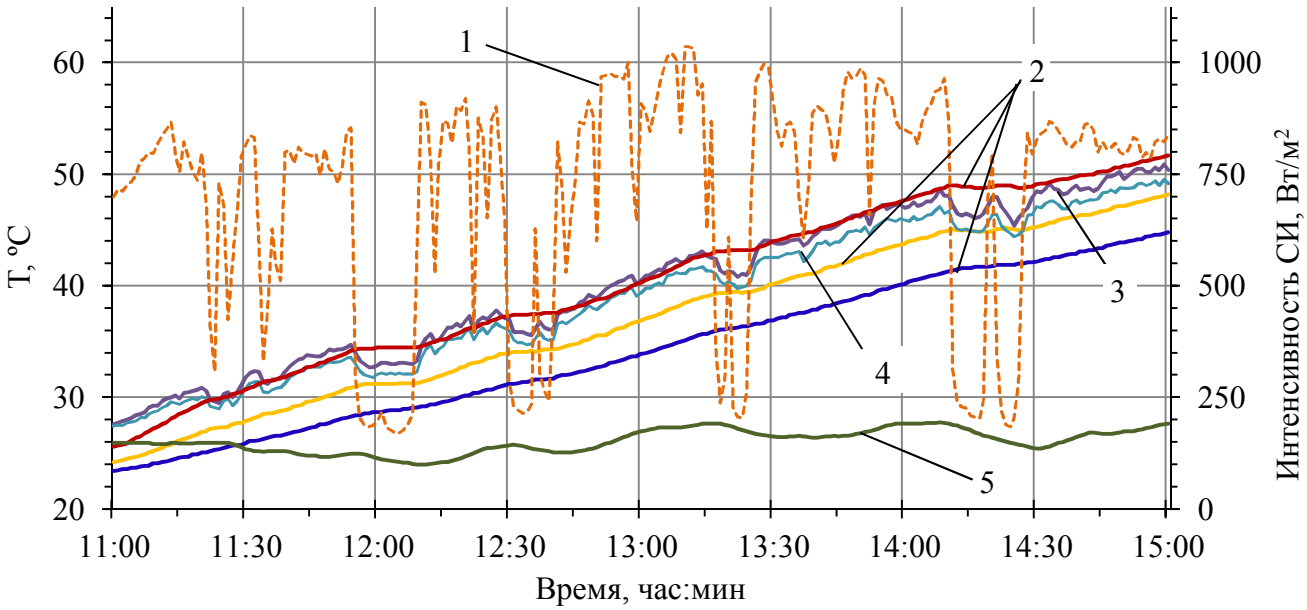


Рисунок 3.13 – Показания термодатчиков и интенсивности СИ в период работы ФЭТМ: 1 – интенсивность СИ; 2 – температура (кривые сверху вниз) в верхних, нижних и средних слоях жидкости в резервуаре модуля относительно его высоты; 3 – температура СЭ на высоте около 225 мм от нижней кромки абсорбера; 4 – температура абсорбера на высоте около 215 мм от нижней кромки абсорбера; 5 – температура окружающего воздуха

Из рисунка 3.13 видно, что в периоды с резким изменением интенсивности СИ с высоких значений на низкие (при облаках) в первые моменты времени происходит существенный спад температуры СЭ и абсорбера, после чего температура изменяется несильно до определенного момента времени (когда интенсивность СИ начинает возрастать). Это подтверждает хороший теплообмен между абсорбером с СЭ и прилегающим к тыльной стороне абсорбера восходящим слоем жидкости. Таким образом, примененные материалы фиксации СЭ к стальному абсорберу ФЭТМ характеризуются хорошими теплофизическими свойствами.

В моменты с низкой интенсивностью СИ в ФЭТМ разность между температурами теплоносителя и абсорбера становится незначительной, а в определённый интервал времени с 14:12 до 14:17, температура между теплоносителем и абсорбером становится равной нулю (см. рисунок 3.13). В этот момент времени температура жидкости 45 ºС (в средних слоях), а температура окружающего воздуха 27,5 ºС, т.е. разность между данными температурами составляет 17,5 ºС. Это показывает, что при нагреве жидкости до 35 ºС и тех же условиях интенсивности СИ нагрев жидкости будет происходить при температуре окружающей среды выше 17,5 ºС в течении всего наблюдаемого периода времени.

При дальнейшем нагреве теплоносителя, когда интенсивность СИ имеет низкое значение, возникает обратный тепловой поток от теплоносителя к окружающей среде через тепловой

абсорбер, поэтому в этот момент температура абсорбера становится ниже температуры теплоносителя. В случае с остеклённым ФЭТМ (рисунок 3.14) описанных явлений не наблюдается, поскольку при высоких температурах теплоносителя остекление модуля существенно снижает его потери. На примере одного малооблачного дня можно выделить, что при невысоких температурах теплоносителя вплоть до 35 ºС характеристики нагрева ФЭТМ с остеклением и без него не существенно отличаются. Другие экспериментальные дни подтверждают это положение. Таким образом, для повышения эффективности ФЭ части ФЭТМ предлагается в летние месяцы зазор между стеклом и СЭ сводится к минимуму, при нагреве им жидкости до 35 ºС. Такое утверждение справедливо при теплотехнических характеристиках изоляции ФЭТМ не хуже, чем для изготовленного макета ФЭТМ, а также при годовых значениях интенсивности СИ и температуре окружающей среды не ниже, чем в Московской области.

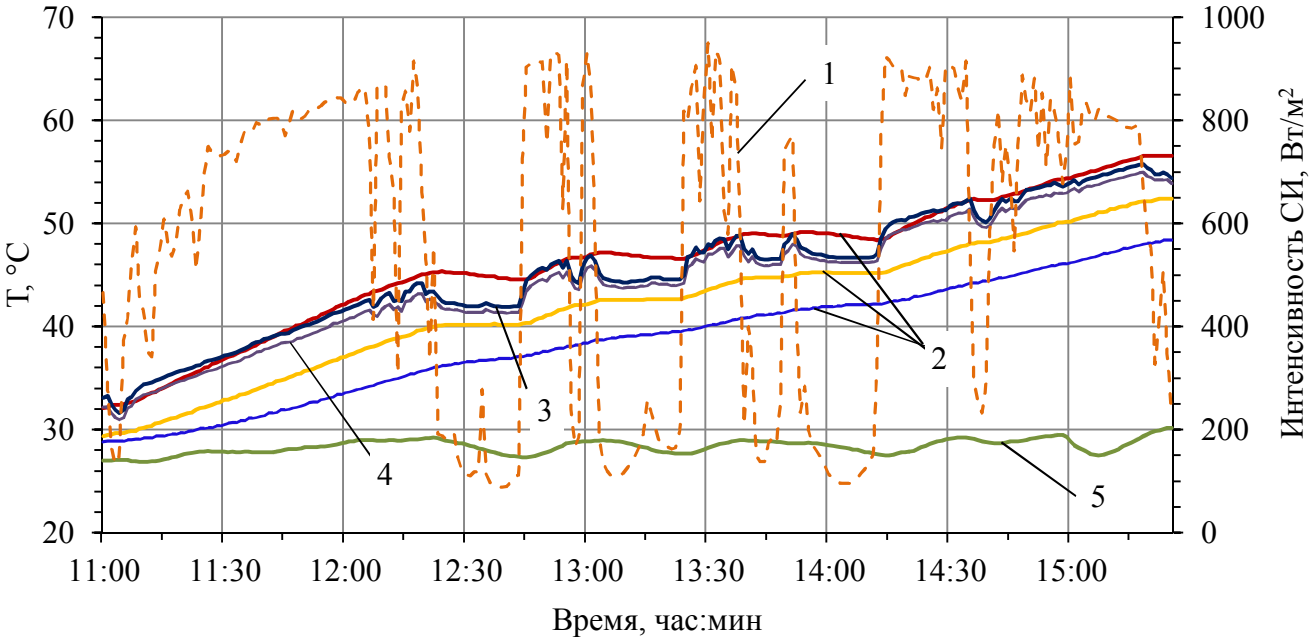


Рисунок 3.14 – Показания термодатчиков и интенсивности СИ в период работы ФЭТМ: 1 – интенсивность СИ; 2 – температура (кривые сверху вниз) в верхних, средних и нижних слоях жидкости в резервуаре модуля; 3 – температура СЭ на высоте около 225 мм от нижней кромки абсорбера; 4 – температура абсорбера на высоте около 215 мм от нижней кромки абсорбера; 5 – температура окружающего воздуха

Отметим, что разность температур между СЭ и теплоносителем снижается по мере повышения температуры теплоносителя, что связано с увеличением тепловых потерь в первую очередь от лицевой стороны фотоприемника ФЭТМ (см. рисунки 3.12, 3.13 и 3.14).

В солнечный день (см. рисунок 3.12) разность температур в различных слоях жидкости (в том числе и в верхнем и нижнем) в резервуаре в первоначальный период работы модуля увеличивается, но со временем становится практически постоянной на протяжении всего

исследуемого процесса нагрева теплоносителя. Данный факт свидетельствует о неизменности тепловых процессов, которые происходят в период работы установки при постоянно высоком потоке СИ. В облачный день (см. рисунки 3.13 и 3.14) разность температур в различных слоях жидкости в резервуаре ФЭТМ также с начала работы установки растет, а затем в периоды снижения интенсивности СИ изменяется незначительно (по сравнению с изменением температуры СЭ и абсорбера). Изменения температуры наблюдаются, когда поток СИ, падающий на ФЭТМ, сильно снижается в течение достаточно длительного периода времени. В такие моменты возникают переходные процессы, вследствие чего наблюдаются резкие колебания температуры фотоприемника, а температура теплоносителя изменяется плавно с некоторой задержкой по времени (порядка 2 минут), что говорит о большой тепловой инерции жидкости. Поэтому кратковременные изменения интенсивности СИ (около 2 минут), как можно видеть из рисунков 3.13 и 3.14, практически не влияют на тепловой процесс нагрева теплоносителя.

Из рисунков 3.13 и 3.14 можно видеть, что рост температуры теплоносителя в нижних слоях постоянен на всем интервале времени. Рост температуры теплоносителя в средних слоях модуля прекращается в периоды, когда существенно снижается (ниже 400 Вт/м^2) интенсивность СИ в течении 2 минут и более. В верхних слоях рост температуры непостоянен, при продолжительных периодах с низкой интенсивностью наблюдается спад температуры теплоносителя. Причем изменения происходят с некоторой задержкой по времени относительно снижения интенсивности СИ (сказывается большая тепловая инерция жидкости). Рост температуры в нижних слоях жидкости в течение всего наблюдаемого периода свидетельствует о том, что активный процесс конвективного переноса масс продолжается некоторое время и после резкого снижения интенсивности СИ. Этот процесс позволяет повысить эффективность работы в дни с кратковременными по времени снижениями интенсивности СИ. В дни с длительными по времени снижениями солнечной радиации эффективность будет только снижаться, поскольку продолжающаяся конвекция жидкости в резервуаре при низкой интенсивности СИ увеличивает потери. Наблюдаемый процесс необходимо учитывать при выборе места эксплуатации установки с точки зрения климатических условий.

Отметим, что даже при высоких значениях интенсивности СИ температура СЭ отличается от температуры теплового абсорбера незначительно, разность в среднем составляет около 1-2 ºС, что видно из показаний термодатчиков на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14. Этот факт свидетельствует о хорошей теплопроводности материалов, используемых для изоляции и фиксации СЭ к тепловому абсорберу и перспективности применяемой технологии.

Поскольку бак имеет объем около 19,85 л на рабочую площадь 0,414 м^2, то нагрев жидкости требует значительного периода времени, и в ясную солнечную погоду она достигнет температуры свыше 35 ºС после часа работы. При прочих погодных условиях время

необходимое для нагрева жидкости до требуемой температуры может существенно увеличиваться, а в некоторые дни заданная температура (свыше 35 ºС) вовсе не достигается. Поэтому целесообразней использовать меньший объем резервуара, чтобы в облачные дни в периоды времени высокой СР, вода успевала бы нагреться и своевременно удалялась в бак-аккумулятор. Уменьшить объем резервуара ФЭТМ возможно за счет уменьшения его толщины (рисунок 2.9), как показали теоретические данные она должна иметь значения 10-20 мм.

Исследование работы ФЭТМ в день высокой облачности. На рисунках 3.15 и 3.16 представлены характеристики ФЭТМ в некоторый период времени одного из экспериментальных дней 21.09.12, в который наблюдалась высокая облачность. Данные температуры и потенциальной мощности ФЭ панели усреднены за 1 минуту, данные интенсивности СИ фиксировались с периодичностью в 25 сек.

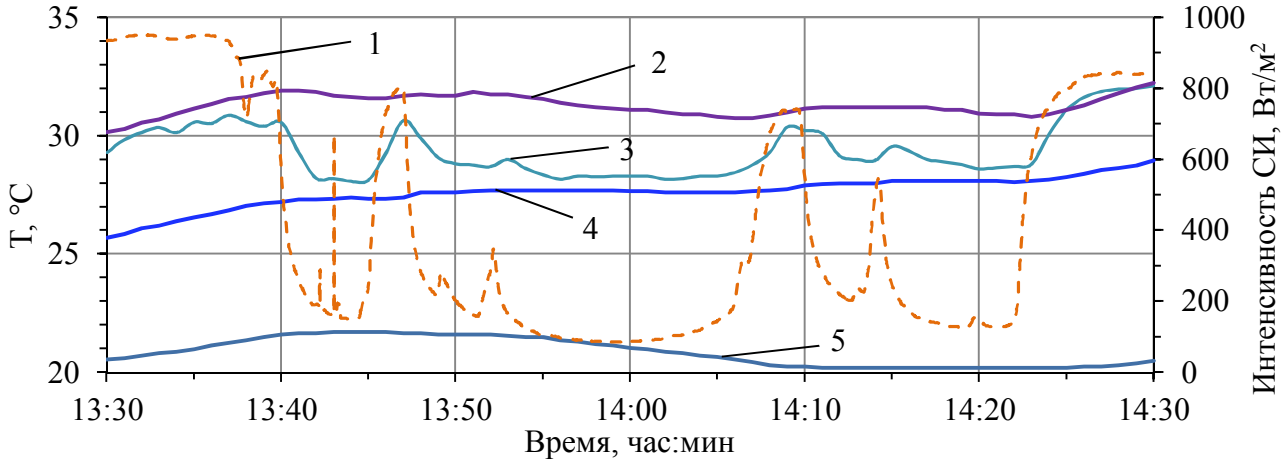


Рисунок 3.15 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТМ: 1 – интенсивность СИ; 2 – температура в верхних слоях жидкости в резервуаре модуля; 3 – температура рабочей поверхности СЭ на высоте около 225 мм от нижней кромки абсорбера; 4 – температура в средних слоях жидкости в резервуаре модуля; 5 – температура окружающего воздуха

Из рисунка 3.15 видно, что при существующем снижении интенсивности СИ вплоть до 85 Вт/м^2 нагрев теплоносителя не осуществляется даже в средних слоях. В период времени, когда интенсивность СИ составляла около 130÷150 Вт/м^2, теплоноситель в верхних слоях также остывал, а в средних слоях наблюдался как рост, так и спад его температуры (из-за инерционности тепловых процессов). Соответственно, при наблюдаемой температуре воздуха и фактических теплотехнических характеристиках макета ФЭТМ, энергии СИ в дни с высокой облачностью недостаточно для нагрева воды до 35 °С, выработка тепловой энергии ФЭТУ в рассматриваемый период времени равна нулю. В кратковременные периоды времени с высокой СР в макете ФЭТМ вода не успевает нагреться до заданной температуры, вследствие, как уже было отмечено, большого объема резервуара при завышенной его толщине.

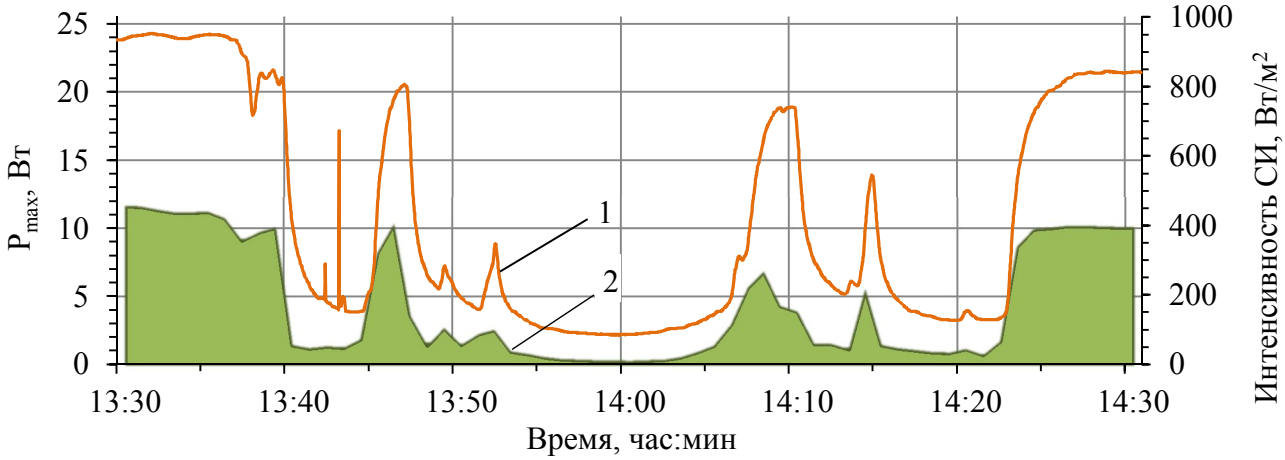


Рисунок 3.16 – Максимальная потенциальная мощность ФЭ панели ФЭТМ в период работы: 1 – интенсивность СИ; 2 – мощность ФЭ панели с фактическим *FF* = 0,46

Влияние низкой интенсивности СИ на выработку электроэнергии также весьма существенно, показатели снижаются в десятки раз (см. рисунок 3.16). Площадь под графиком показывает вырабатываемую электрическую энергию ФЭ панелью ФЭТМ. В отличие от тепловой энергии потенциальная выработка электроэнергии в рассматриваемый период времени макетом ФЭТУ будет производиться. В кратковременные периоды с высокой СР объем резервуара будет оказывать уже положительное влияние на ФЭ панели, вследствие медленного нагрева и низких температур теплоносителя (см. рисунок 2.21).

3.5.3 Особенности продольного и поперечного расположения модуля

Следующий этап исследований заключался в сравнении характеристик ФЭТМ при его монтаже в двух положениях: продольном и поперечном. Под продольным положением предполагается расположение модуля вдоль горизонта относительно его длины, а под поперечным – расположение, когда модуль находится перпендикулярно горизонту относительно его длины (рисунок 2.9).

Для сравнения характеристик ФЭТМ при продольном и поперечном положении была проведена серия экспериментов. Данные двух экспериментальных дней с типичными фиксируемыми параметрами и характеристиками с точки зрения работы модуля, отражающие особенности его расположения, представлены на рисунках 3.17-3.20. Результаты мониторинга параметров ФЭТМ в зависимости от СИ, наблюдаемые 12.07.12 и приведённые на рисунках 3.17 и 3.18, получены при его продольном положении. Результаты мониторинга параметров модуля в зависимости от СИ наблюдаемые 12.09.12 и приведённые на рисунках 3.19 и 3.20, получены при поперечном положении. В эти дни остекление на ФЭТМ

установлено не было. На рисунке А.2 и А.3 (приложение А) приведены данные мониторинга напряжения холостого хода и тока короткого замыкания ФЭ панели ФЭТМ 12.07.12 и 12.09.12.

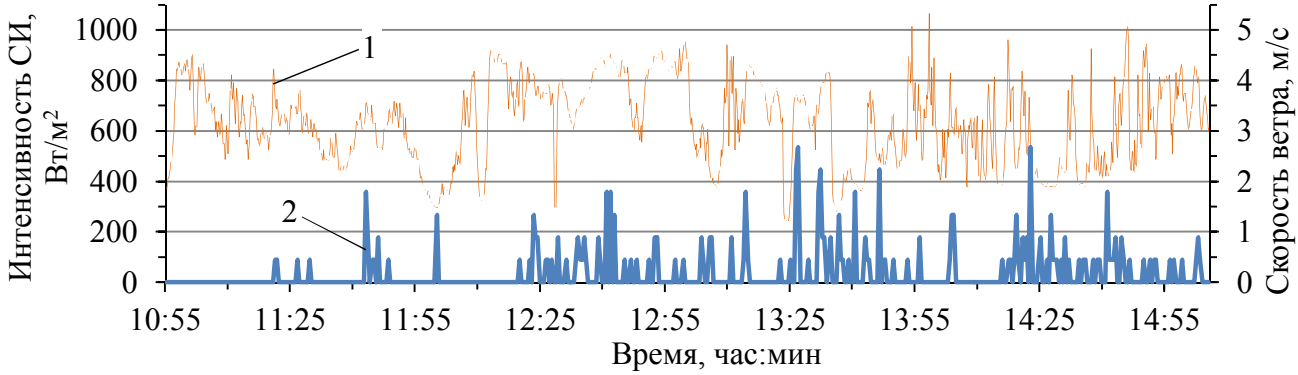


Рисунок 3.17 – Изменение интенсивности СИ (1) и скорости ветра (2)

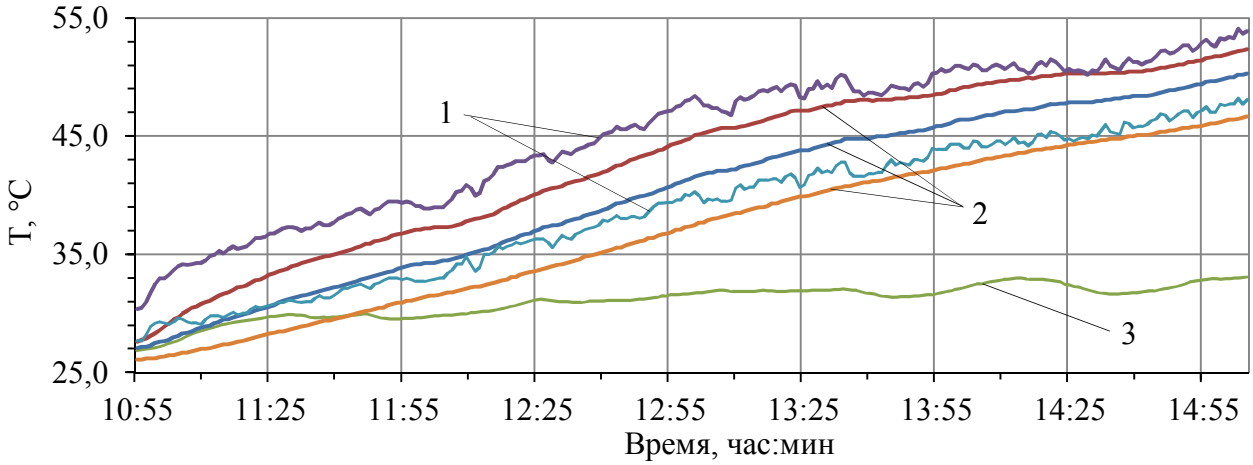


Рисунок 3.18 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТМ:

1 – температура вверху и внизу теплового абсорбера; 2 – температура теплоносителя (кривые сверху вниз) в верхних, средних и нижних слоях в резервуаре модуля; 3 – температура окружающего воздуха

При поперечном расположении модуля его высота увеличилась примерно в два раза, при этом разность температур между верхней и нижней точками фотоприемника также увеличилась примерно вдвое (см. рисунки 3.12, 3.18 и 3.20). Этот факт, а так же температуры в слоях жидкости в резервуаре (см. рисунок 3.12, 3.13, 3.14) подтверждают в целом линейное распределение температуры вдоль высоты фотоприёмника ФЭТМ, в соответствии с теоретическими данными.

В результате увеличения разницы температур между вертикальными слоями жидкости, как можно видеть из рисунка 3.20, характер наклона кривой температуры в верхних слоях жидкости существенно отличается от такового для нижних слоев в сравнении с кривыми на рисунке 3.12. Нагрев в верхних слоях начинает происходить быстрее, а в нижних слоях медленнее, поэтому при достижении температурой в верхних слоях значения 35 ºС температура в нижних слоях изменяется несущественно по сравнению с начальным значением.

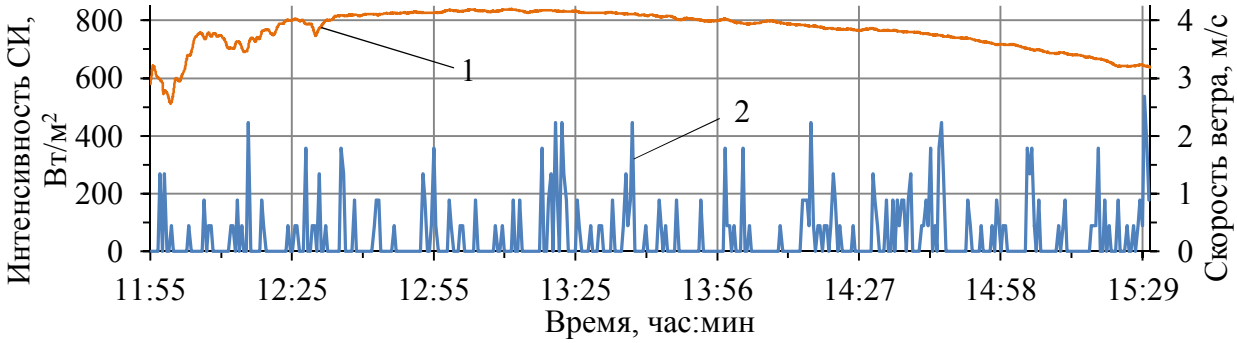


Рисунок 3.19 – Изменение интенсивности СИ (1) и скорости ветра (2)

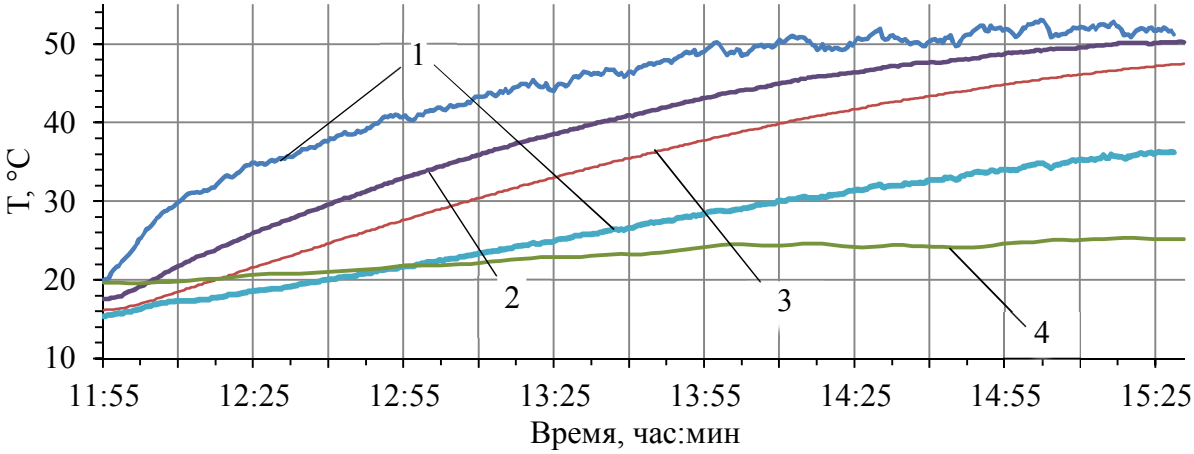


Рисунок 3.20 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТМ:
1 – температура (кривые сверху вниз) вверху и внизу теплового абсорбера; 2 – температура жидкости в 80 мм от верхней кромки резервуара; 3 – температура жидкости в 720 мм от нижней кромки резервуара; 4 – температура окружающего воздуха

Принимая разницу температур между верхней и нижней кромкой абсорбера пропорциональной высоте резервуара модуля (при температуре 35 °C ΔT = 7 °C при 430 мм), рассчитываем необходимую высоту для эффективной работы (см. раздел 2.5.3) ФЭТМ с толщиной резервуара около 50 мм. Она составит около 2000 мм. С учетом того, что разность температур между верхней и нижней кромкой абсорбера при толщине резервуара 10-20 мм меньше, чем при толщине 50 мм, рекомендуется высота резервуара свыше 2000 мм. Анализ теоретических данных показал, что данное значение должно быть свыше 1600 мм. Несоответствие данных связано главным образом с неучётом тепловых потерь при математическом моделировании. 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 чего рекомендуется высота (расстояние по вертикали) резервуара ФЭТМ с толщиной 10-20 мм около 2000 мм.

Сравнивая работу модуля в двух положениях, следует также отметить, что при одинаковой температуре верхних слоев жидкости средняя температура абсорбера резервуара при поперечном расположении ниже, чем при продольном (рисунки 3.18 и 3.20). Соответственно, ниже средняя температура жидкости и СЭ при поперечном расположении ФЭТМ, что приводит к большей выработке электроэнергии (при прочих равных условиях).

На рисунке 3.21 сопоставлены усреднённые за одну минуту данные нагрева жидкости в течение 40 минут в ФЭТМ при его расположении в двух исследуемых положениях. Данные были получены в ходе экспериментов, проведенных 21.06.12 и 12.09.12.

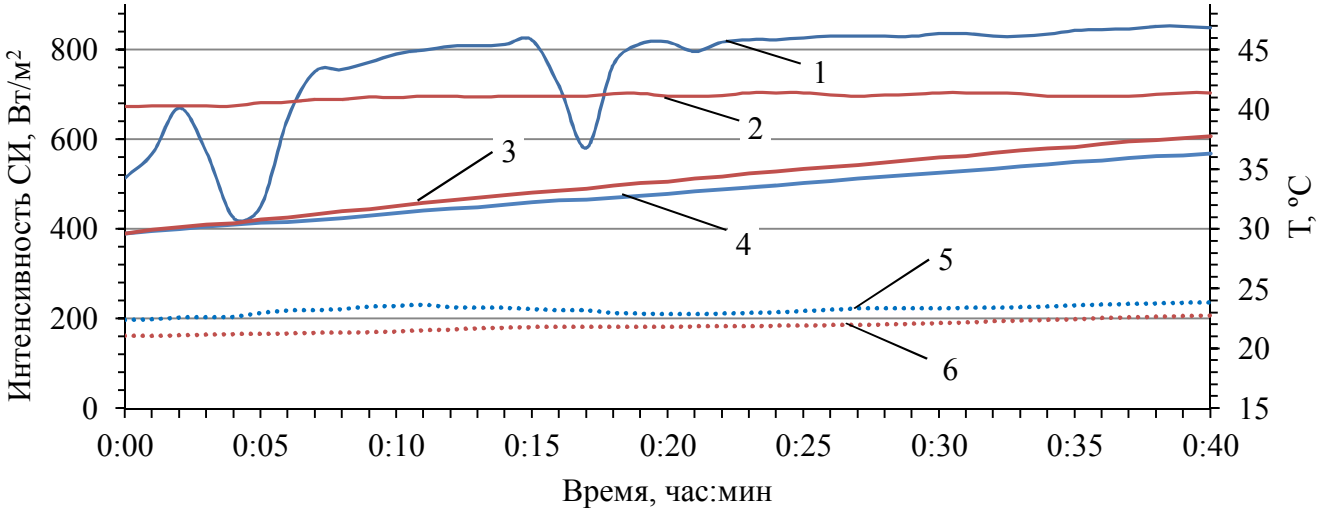


Рисунок 3.21 – Нагрев воды в верхних слоях резервуара ФЭТМ в продольном расположении (4) при интенсивности СИ (1), температуре окружающей среды (5) и в поперечном расположении (3) при интенсивности СИ (2), температуре среды (6)

Как можно видеть, 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 ранее начало срабатывания сливного клапана (см. рисунки 3.18; 3.20; 3.21), а значит и большую выработку тепловой энергии. Причем нагрев жидкости осуществляется быстрее при 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 от установки, что частично позволяет реализовать поперечное положение ФЭТМ. А с учетом климатических условий Московской области и страны в целом эффективная работа установки в облачные дни является весьма актуальной задачей.

3.5.4 Работа ФЭТМ в составе гелиоустановки

Следующий этап экспериментов заключался в исследовании работы ФЭТМ совместно с СК в составе установки, при этом жидкость поступала в ФЭТМ из напорного бака (см. глава 2, рисунок 2.6). Процесс работы установки описан в разделе 2.4.

Исследование тепловой части гелиоустановки. Данные мониторинга определенных параметров, измеренных в один из экспериментальных дней (20.09.12), показаны на рисунках 3.22, 3.23 и 3.24; в этот день на ФЭТМ, как и на СК, было установлено остекление. Установка работала в режиме, когда датчик расположен в резервуаре ФЭТМ у выходного патрубка, вследствие чего с помощью термореле температура ФЭ панели модуля не будет превышать заданного значения в течение всего дня (кривая 3, рисунок 3.24).

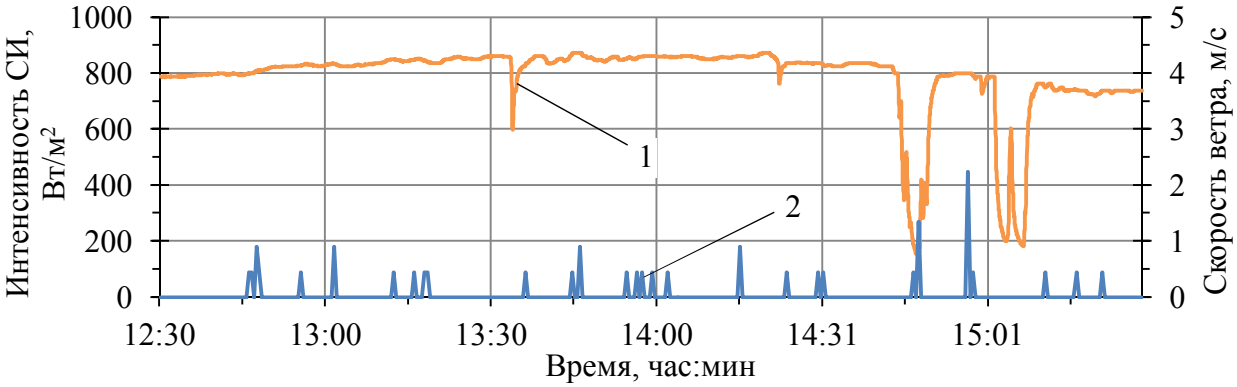


Рисунок 3.22 – Изменение интенсивности СИ (1) и скорости ветра (2)

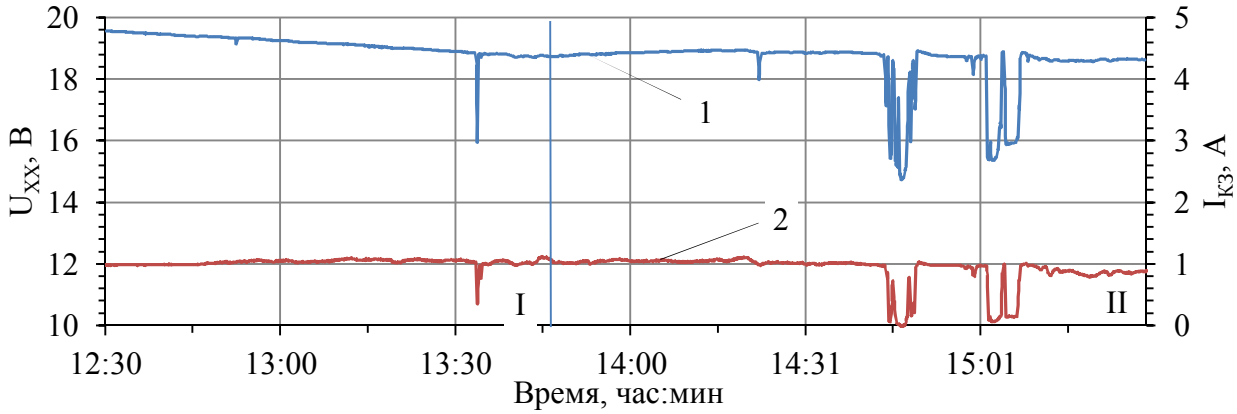


Рисунок 3.23 – Показания U_{xx} (1) и $I_{кз}$ (2) фотоэлектрической панели ФЭТМ

Как можно видеть из экспериментальных данных (рисунок 3.24) температура абсорбера, а, значит, и температура СЭ ФЭТМ, не превышает определенного значения, а в моменты снижения интенсивности СИ и вовсе снижается. Со временем после начала работы клапана температура в центре абсорбера и жидкости в средних слоях резервуара (кривая 3 и 5, рисунок 3.24) до определенного времени снижается (с 13:45 до 14:10), что обусловлено, в основном,

влиянием холодной жидкости заливаемой в резервуар (при высоте резервуара 431 мм). Таким образом, поток холодной жидкости, поступающей в резервуар, снижает температуру в средних и нижних слоях жидкости, за счет чего повышается и эффективность СЭ. При предложенной согласно аналитическому анализу высоте резервуара 2000 мм описанный переходный процесс, наблюдаемый на рисунке 3.24 (с 13:45 до 14:10), будет не столь выраженным, что в свою очередь, также повысит эффективность СЭ.

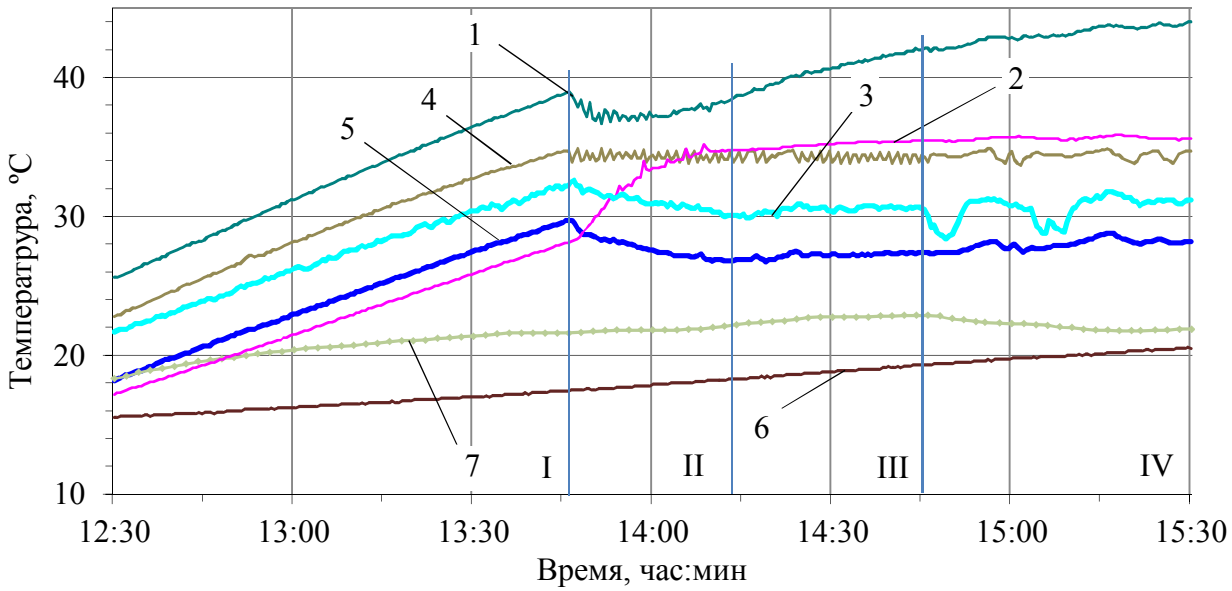


Рисунок 3.24 – Показания термодатчиков в период работы ФЭТМ и СК:
1 – температура теплоносителя в верхних слоях СК; 2 – температура теплоносителя в нижних слоях СК; 3 – температура по вертикали в центре абсорбера ФЭТМ; 4 – температура теплоносителя в верхних слоях ФЭТМ; 5 – температура теплоносителя в средних слоях ФЭТМ; 6 – температура воды в напорном баке; 7 – температура окружающего воздуха

Из рисунка 3.24 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 определенного неизменяющегося с течением времени значения.

Одной из причин медленного нагрева жидкости в СК является значительный объём резервуара вследствие его толщины в 50 мм, из-за чего процесс нагрева воды в нем становится очень длительным. Соответственно, целесообразно в подобной установке использовать СК с небольшим объемом резервуара (достигаемым при толщине 10-20 мм), большей длиной по вертикали фотоприемника и высокими теплоизоляционными свойствами материалов, применяемых в конструкции. Тогда нагрев воды в СК будет происходить быстрее, чем в ФЭТМ, и после первого срабатывания клапана температура жидкости в СК будет существенно выше, чем в ФЭТМ. Выбор оптимальных площадей фотоприемников ФЭТМ и СК с учетом их

характеристик (толщины резервуара, теплотехнических свойств и др.) для эффективной работы ФЭТУ показан в главе 4.

Представленные и описанные процессы функционирования ФЭТУ (рисунок 3.24) 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. Но при изготовлении СК для такой установки необходимо оптимально подбирать параметры его материалов и конструкции.

Система автоматики и технологическая схема солнечной когенерационной установки, как видно из рисунка 3.24, полностью обеспечивают контроль температуры жидкости на выходе из ФЭТМ или СК (если датчик температуры будет установлен вблизи его выходного патрубка), и тем самым, предоставляют и контроль задаваемой температуры СЭ ФЭТМ.

СК и ФЭТМ имеют одинаковую конструкцию и объем резервуаров, но разный материал резервуара: СК выполнен из алюминия, а ФЭТМ из стали. Из рисунка 3.24 видно, что характер кривых нагрева жидкости до 13:00 практически идентичен. С увеличением температуры в ходе кривых появляются незначительные отличия. Таким образом, подтверждается положение о том, что на эффективность ФЭТМ и СК с применяемой конструкцией несущественно влияет металл (сталь, алюминий, медь), из которого выполнен абсорбер.

В связи с линейным ростом температуры вдоль высоты модуля в его конструкции для работы по разработанной схеме можно предусмотреть ступенчатое (линейное) увеличение толщины теплоизоляции, а также меры по повышению теплоизоляции с лицевой стороны СЭ в верхней части модуля. Стоит также отметить, что для ФЭТМ, работающих по схемам с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя, нелинейная теплоизоляция не допускается. Связано это с тем, что температура в нижней части и, соответственно, в ФЭТМ, работающих по схеме с циркуляцией теплоносителя, может существенно повышаться в течение дня в отличие от температуры в предлагаемой схеме, где она слабо изменяется (после начала работы клапана см. рисунок 3.24). В результате повышения температуры увеличиваются потери, поэтому снижение изоляции вдоль высоты модуля привело бы к повышенным потерям тепловой энергии.

Совместно с температурой жидкости, вырабатываемой гелиоустановкой, важной является тепловая мощность установки (рисунок 3.25). На рисунке сопоставлены график выработки тепловой мощности модуля в день эксперимента, построенный на основе данных математической модели, и значения, определяющие эту мощность на основе данных мониторинга температуры нагрева жидкости.

Поскольку в период процесса дозированного слива и залива жидкости (работы электромагнитного клапана) в ФЭТМ и СК температура воды сильно колебалась, то в эти

моменты времени нет возможности получить достоверные фактические данные по мощности, поэтому в некоторые интервалы времени на рисунке отсутствуют показатели найденные на основе данных мониторинга.

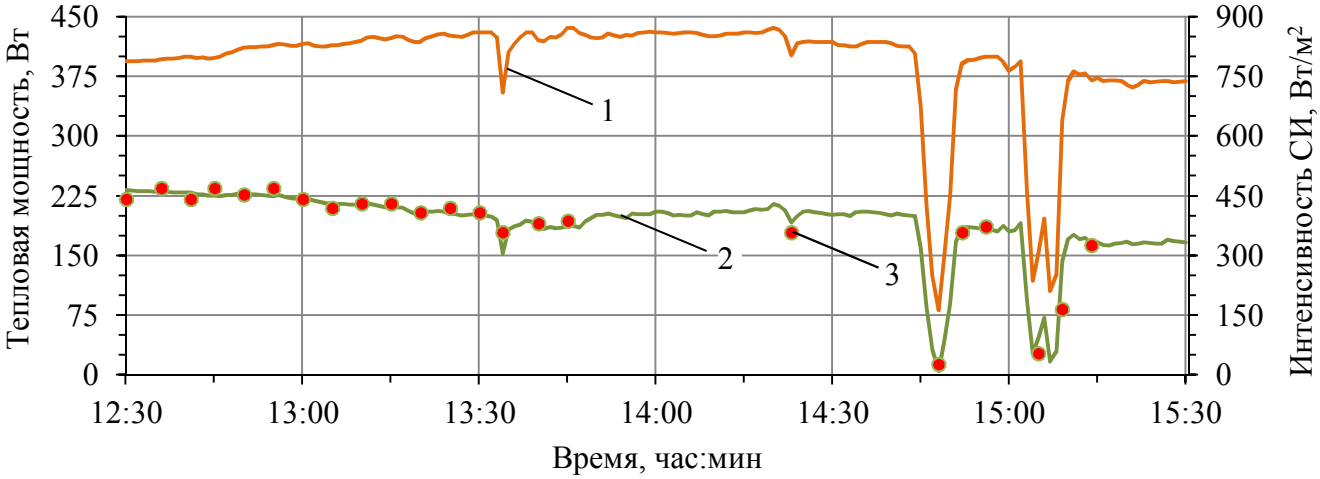


Рисунок 3.25 – Производство тепловой энергии в период работы ФЭТМ
1 – интенсивность СИ; 2 – выработка согласно математической модели; 3 – значения фактической выработки модулем

Полученные данные, как видим, имеют значения близкие к данным фактической выработки. Отклонения опытных данных от смоделированных не превышают 5 %. Аналитическое сравнение экспериментальных данных с математическими в другие дни показало, что для ясных солнечных дней результаты оказываются близкими к экспериментальным. Рассмотренные данные наглядно показывают возможности моделирования выработки тепловой энергии созданной математической моделью установки.

Исследование электрической части гелиоустановки. Рассмотрим подробней, как в разработанной установке работает система автоматики и насколько качественно осуществляется контроль параметров ФЭ панели на заданном уровне. На рисунке 3.26 представлены показания (усреднённые за одну минуту) одного из экспериментальных дней (22.08.2012).

На примере изменения параметров напряжения холостого хода показано, что система автоматики в разработанной технологической схеме поддерживает показатели выработки ФЭ панели ФЭТМ на заданном уровне. Из хода кривых № 3 и 4 (рисунок 3.26) видно, что происходит снижение напряжения холостого хода при нагреве теплоносителя в резервуаре ФЭТМ до начала момента срабатывания клапана, после чего, благодаря работе системы автоматики, напряжение стабилизируется. Расположенная ниже первая группа СЭ ФЭ панели относительно четвертой группы имеет незначительные отличия в характере изменения U_{XX} до начала работы клапана системы автоматики, после чего напряжение первой группы начинает возрастать вследствие поступления в резервуар холодной жидкости из напорного бака (см.

рисунок 3.26 б)), а затем после 13:50 начинает несущественно (на 0,11 В) снижаться вследствие небольшого нагрева поступающей жидкости.

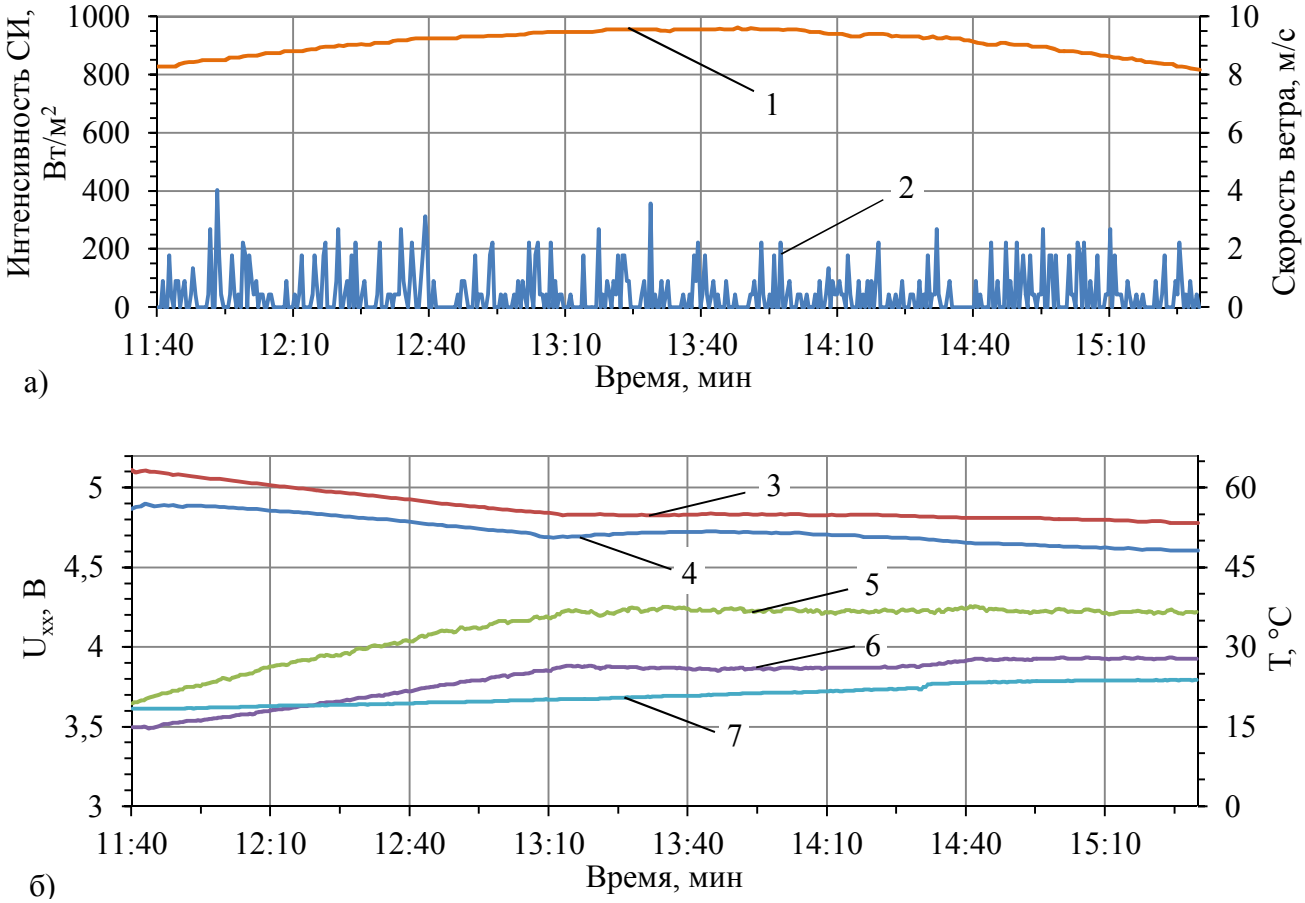


Рисунок 3.26 – Показания U_{xx} различных групп ФЭ панели ФЭТМ (б) в зависимости от средней температуры этих групп при соответствующей интенсивности СИ и скорости ветра (а):
1 – интенсивности СИ; 2 – скорость ветра; 3 – U_{xx} 4 группы; 4 – U_{xx} 1 группы;
5 – температура верхней части абсорбера; 6 – температура в нижней части абсорбера;
7 – температура воды в напорном баке

Очевидно, что средняя температура в резервуаре и, соответственно, тепловая и электрическая эффективность ФЭТМ во время работы зависят от температуры поступающей в резервуар ФЭТМ жидкости (рисунок 3.26 б). В данной технологической схеме она слабо изменяется в течение дня, соответственно, незначительно меняются и показатели ФЭ панели, в отличие от установок, работающих по одноконтурным схемам с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя. В ФЭТМ, работающих по замкнутой схеме, жидкость, поступающая в него в течение дня, постоянно, с постепенным нагревом, циркулирует между модулем и баком-аккумулятором. В результате существует зависимость изменения температуры на входном патрубке ФЭТМ от объема бака-аккумулятора. СЭ в этом случае некоторую часть времени работают при высокой температуре теплоносителя. Тепловая эффективность СК из-за повышения температуры на входном патрубке может снижаться на 20-

30 % в течение дня [131], что приводит к снижению эффективности ФЭ панелей в ФЭТМ. Очевидно, что снижение как тепловой, так и электрической эффективности зависит от многих технологических и конструктивных параметров ФЭТМ и для каждой конкретной установки может отличаться. Поэтому оценим это изменение на конкретном примере. Для определения влияния тепловой эффективности на параметры ФЭ панели ФЭТМ использовалось выражение оценки эффективности СК [132]:

$$\eta = F_R \cdot \tau\alpha - F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{T_{ср} - T_{окр}}{q_{СИ}} \right), \qquad (3.1)$$

где F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора – 0,824;

α – поглощательная способность абсорбера – 0,95;

τ – пропускательная способность прозрачной изоляции – 0,88;

U_L – полный коэффициент тепловых потерь – 6.

$T_{ср}$ – средняя температура жидкости в коллекторе.

По выражению (3.1) было оценено изменение средней температуры жидкости в СК при снижении тепловой эффективности на 20-30 %, с учетом которого определено влияние на эффективность СЭ. В результате расчетов повышение ФЭ эффективности в ФЭТМ (с кристаллическими кремниевыми СЭ), работающему в разработанном режиме, может составлять 12-19 %. При расчете не учитывалась разность температур между ФЭ панелью и жидкостью в коллекторе, коэффициент изменения КПД СЭ от температуры был принят 0,005 °С.

На рисунках 3.27 и 3.28 продемонстрированы параметры ФЭ панели ФЭТМ в один из экспериментальных дней (22.06.2012); видно, насколько сильно они подвержены влиянию облаков.

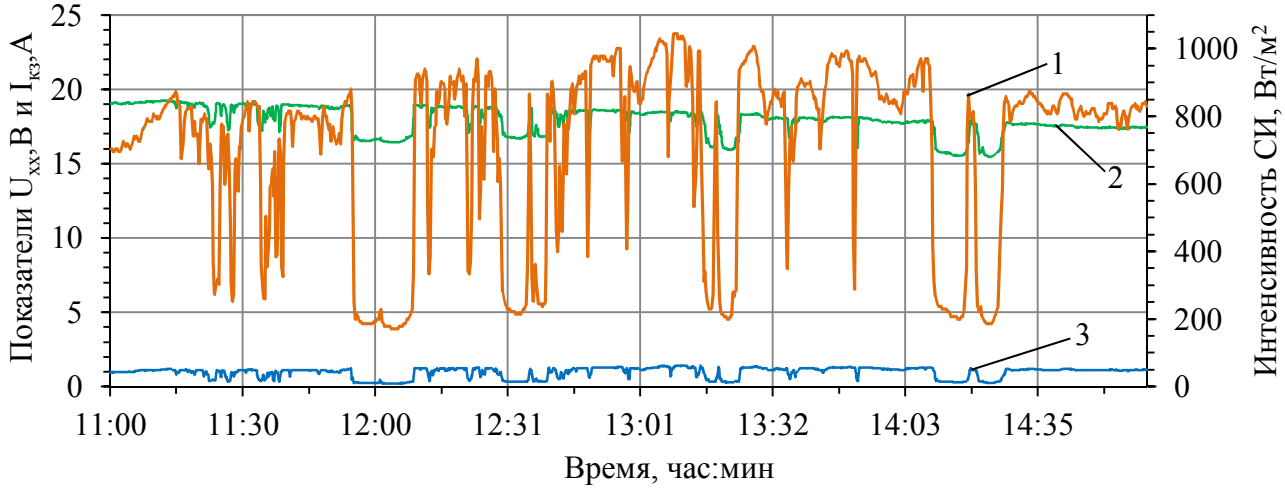


Рисунок 3.27 – Показания U_{xx} (2) и $I_{кз}$ (3) ФЭ панели ФЭТМ при интенсивности СИ (1)

На рисунке 3.28 представлены данные ФЭ панели, полученные с помощью устройства мониторинга потенциальной выработки с использованием показателей U_{xx} и $I_{кз}$ (см. рисунок 3.27).

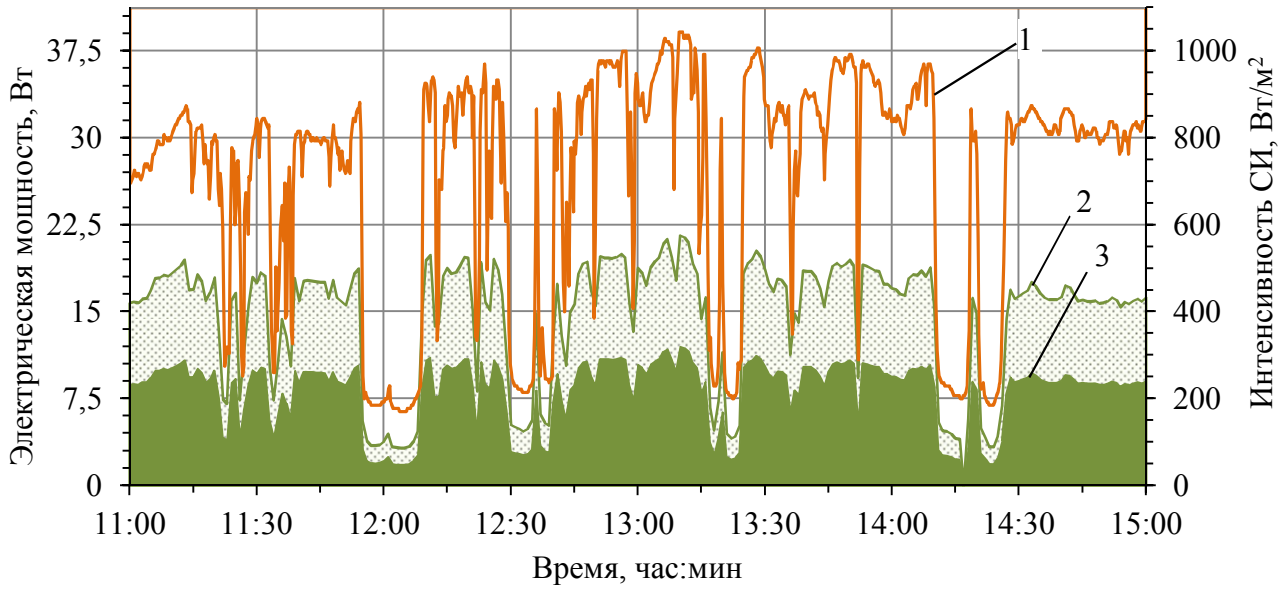


Рисунок 3.28 – Потенциальная мощность ФЭ панели ФЭТМ

1 – интенсивность СИ; 2 – мощность ФЭ панели с $FF = 0{,}85$; 3 – мощность ФЭ панели с фактическим $FF = 0{,}46$

Представленные данные вырабатываемой мощности усреднены за одну минуту, данные интенсивности СИ фиксировались с периодичностью в 25 сек, данные U_{xx} и $I_{кз}$ – с периодичностью в 5 сек. Площадь под графиком показывает электрическую энергию, вырабатываемую ФЭ панелью ФЭТМ.

Потенциальная выработка фактической ФЭ панели, как можно видеть, имеет невысокие показатели, но за счет устройства мониторинга потенциальной выработки появляется возможность оценить выработку ФЭ панели с более высокими характеристиками (обладающей $FF = 0{,}85$) (см. рисунке 3.28). Т.е. данный способ определения потенциальной выработки электроэнергии позволяет, кроме оценки производства фактической панелью, оценивать параметры ФЭ панели с другим FF, U_{XX} и $I_{КЗ}$.

Отметим, что система автоматики и технологическая схема солнечной когенерационной установки обеспечивают заданную работу ФЭТМ. Слив жидкости осуществляется при заданной температуре (около 35 °С), отклонения незначительные. Непредвиденных процессов, ухудшающих работу системы в ходе экспериментальных исследований, выявлено не было. Полученные результат подтверждают обоснованность практической реализации разработанной технологической схемы.

3.6 Выводы по главе

1. Разработанный комплекс мониторинга основных параметров гелиоустановки с ФЭП позволяет не только экономить время при обработке информации, определять основные параметры ФЭТУ с одновременным мониторингом метеопараметров, получать информацию о протекающих процессах, но и оценивать потенциальную выработку СЭ с различными характеристиками.

2. Технология фиксации СЭ к стальному абсорберу ФЭТМ показала хорошие результаты. Экспериментально установлено, что при интенсивности СИ 1000 Вт/м^2, температуре окружающей среды около 27 ºС и температуре жидкости в диапазоне 30-55 ºС температура между поверхностью ФЭП и абсорбера не превышает 2 ºС. Это также показывает, что для подобной конструкции модуля нет необходимости в использовании дорогих материалов, таких как медь или алюминий.

3. Проведенные натурные исследования подтвердили теоретические данные температурного расслоения жидкости, возникающего вдоль вертикальной оси. С учетом особенностей монтажа и эксплуатации, а также отклонений от теоретических расчетов, рекомендуется высота ФЭТМ около 2000 мм.

4. Исходя из экономических аспектов и работы ФЭТМ в составе разработанной технологической схемы, толщина теплоизоляции модуля должна быть неравномерной и ступенчато (линейно) увеличиваться к вершине вдоль вертикальной оси. А меры по снижению конвективных потерь должны применяться в основном в верхней части ФЭТМ.

5. Благодаря разработанной схеме и системе автоматики температура СЭ ФЭТМ должным образом контролируется на заданном уровне, что подтверждается экспериментально.

6. Показано, что разработанная технологическая схема солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ с разомкнутым контуром и дозированной подачей теплоносителя позволяет повысить производство электроэнергии до 19 % (для кристаллических кремниевых СЭ) по сравнению с установками с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя.

7. Проведенное диссертационное исследование показало возможность работы солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ по принципиально отличающейся от традиционных для СК схеме: с разомкнутым контуром циркуляции теплоносителя и с электромагнитным клапаном, контролирующим поток теплоносителя через модуль.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Результаты проведённых исследований демонстрируют возможность создания эффективной когенерационной установки, обеспечивающей потребность широкого круга потребителей. Однако конечное решение при внедрении установок принимается исходя из результатов экономической оценки изделия.

На сегодняшний момент одними из немногих направлений использования ВИЭ, которое способно конкурировать с традиционными источниками энергии, являются коллекторные системы. В связи с этим комбинация ФЭП и СК в рамках одного устройства позволяет помимо повышения универсальности установки обеспечивать продвижение и развитие более дорогих технологий фотоэлектричества.

Таким образом, комплексный подход построения устройства позволяет также компенсировать дороговизну ФЭП, однако конечную цену этого решения покажет экономическая оценка эффективности их применения.

4.1 Определение характеристик фотоэлектрической тепловой установки, необходимых для обеспечения заданной нагрузки

Для разработанной ФЭТУ выработка именно тепловой энергии является преобладающей, поэтому ее характеристики могут быть найдены 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. Непокрытая часть нагрузки при этом должна обеспечиваться либо за счет других установок на основе ВИЭ, либо за счет традиционных источников энергии. Исходя из рекомендаций [13, 14] долю покрытия тепловой нагрузки примем равной 50 %, т.е. коэффициент замещения $f = 0{,}5$.

Тепловая нагрузка ФЭТУ определяется потреблением горячей воды семьей из четырех человек, имеющей личное подсобное хозяйство (таблица 4.1). Примем, что личное подсобное хозяйство включает одну корову, одного теленка на откорме, четыре овцы, 12 кур, теплицу площадью 10 м^2. Нормы потребления тепловой энергии определяемой горячим водоснабжением для личного подсобного хозяйства даны в [133].

Таким образом, требуемый объем тепловой энергии для семьи из четырех человек, содержащей личное подсобное хозяйство, составит $Q_T = 4080$ кВт·ч/год.

Площадь ФЭТМ и СК ФЭТУ, необходимую для покрытия половины (так как коэффициент замещения $f = 0{,}5$) этой нагрузки определим через величину расхода жидкости за год. Необходимый объем горячей жидкости за год $G_{ФЭТУ}$, (л/год) найдем из уравнения нагрева жидкости:

$$G_{ФЭТУ} = \frac{Q_T \cdot 3600 \cdot f}{c_p \cdot (t_{вых}^{ФЭТУ} - t_{вх}^{ФЭТУ})} \quad (4.1)$$

где c_p – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·ºС) для воды равна 4,2 кДж/(кг·ºС);

$t_{вых}^{ФЭТУ}$ – температура горячей воды на выходе ФЭТУ, принята равной 60 °С [134] ;

$t_{вх}^{ФЭТУ}$ – температура холодной воды на входе ФЭТУ, принята равной температуре окружающей среды $t_{ОС}$, °С.

Таблица 4.1. – Годовое потребление горячей воды семьей из четырех человек, имеющей личное подсобное хозяйство

Потребитель тепловой энергии	Потребление тепловой энергии на 1 единицу, кВт·ч/год	Количество	Суммарное потребление тепловой энергии, кВт·ч/год
Человек	800	4	3200
Корова	230	1	230
Теленок на откорме	90	1	90
Овца	17	4	68
Курица	16	12	192
Теплица	30	10	300
Итого:			4080

Необходимо учитывать, что вода нагревается в две стадии (ступени): на первом этапе за счет ФЭТМ до 35 °С [21], на втором за счет СК до заданной температуры. При этом оптимальный режим работы ФЭТУ определяется, исходя из равенства объемов производства нагретой воды ФЭТМ и СК. Таким образом, для получения максимального количества тепловой энергии ФЭТУ должно выполняться равенство:

$$G_{ФЭТУ} = G_{ФЭТМ} = G_{СК} \quad (4.2)$$

где $G_{ФЭТМ}$ – объем нагретой жидкости за год ФЭТМ, л/год;

$G_{СК}$ – объем нагретой жидкости за год СК, л/год.

Различные характеристики ФЭТМ и СК определяют разную удельную производительность нагретой ими воды. Поэтому равенство (4.2) запишется следующим образом:

$$G_{ФЭТУ} = G_{ФЭТМ}^{уд} \cdot A_{ФЭТМ} = G_{СК}^{уд} \cdot A_{СК} \quad (4.3)$$

где $G_{ФЭТМ}^{уд}$ – удельная производительность нагретой жидкости ФЭТМ, л/(год·м^2);

$A_{ФЭТМ}$ – площадь ФЭТМ, м^2;

$G_{СК}^{уд}$ – удельная производительность нагретой жидкости СК, л/(год·м^2);

$A_{СК}$ – площадь СК, м^2.

Отсюда с учетом средних за год значений можно выразить оптимальное соотношение площадей ФЭТМ и СК, а также найти непосредственно их величины, необходимые для покрытия заданной тепловой нагрузки.

При этом удельную производительность нагретой жидкости ФЭТМ и СК найдем опять же через выражение нагрева жидкости:

$$G_{ФЭТМ}^{уд} = \frac{Q_{ФЭТМ}^{уд}}{c_p \cdot (t_{вых}^{ФЭТМ} - t_{вх}^{ФЭТМ})} \quad (4.4)$$

$$G_{СК}^{уд} = \frac{Q_{СК}^{уд}}{c_p \cdot (t_{вых}^{СК} - t_{вх}^{СК})} \quad (4.5)$$

где: $Q_{ФЭТМ}^{уд}$ – удельная выработка тепловой энергии ФЭТМ, кВт·ч/(м^2·год);

$t_{вых}^{ФЭТМ}$ – температура на выходе ФЭТМ, °С;

$t_{вх}^{ФЭТМ}$ – температура на входе ФЭТМ, °С ($t_{вх}^{ФЭТМ} = t_{вх}^{ФЭТУ} = t_{ОС}$);

$Q_{СК}^{уд}$ – удельная выработка тепловой энергии СК, кВт·ч/(м^2·год);

$t_{вых}^{СК}$ – температура на выходе СК, °С ($t_{вых}^{ТК} = t_{вых}^{ФЭТУ} = 60$ °С);

$t_{вх}^{ФЭТМ}$ – температура на входе СК, °С ($t_{вх}^{ТК} = t_{вых}^{ФЭТМ} = 35$°С).

В свою очередь удельную выработку тепловой энергии ФЭТМ и СК определим с помощью математической модели системы, представленной в разделе 2.5. При этом характеристики ФЭТУ в расчете на опытный образец приняты следующими: $l_{ТП}^{ФЭТМ} = l_{ТП}^{СК} =$ 1,585 м – длина тепловоспринимающей поверхности; $b_{ТП}^{ФЭТМ} = b_{ТП}^{СК} =$ 0,815 м – ширина тепловоспринимающей поверхности; $\delta_{ст.из}^{ФЭТМ} = \delta_{ст.из}^{СК} =$ 0,025 м – толщина изоляционного материала стенки; $\delta_{дн.из}^{ФЭТМ} = 0{,}025$, $\delta_{дн.из}^{СК} =$ 0,05 м – толщина изоляционного материала дна; $A_{габ}^{ФЭТМ} = A_{габ}^{СК} =$ 1 м^2 – габаритная площадь; $\delta_{бак}^{ФЭТМ} = 0{,}02$, $\delta_{бак}^{СК} =$ 0,01 м – толщина бака с водой; $L^{ФЭТМ} = 0$, $L^{СК} =$ 0,03 м – величина воздушного зазора между приемником и стеклом; $\tau^{ФЭТМ} = \tau^{СК} =$ 0,92 – коэффициент светопропускания стекла; $\alpha^{ФЭТМ} = 0{,}9$; $\alpha^{СК} =$ 0,92 – коэффициент поглощения СИ;

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

Математическая модель также позволяет определить установленную (номинальную) мощность фотоэлектрической панели ФЭТМ при ее номинальном КПД равном 14 %, а также почасовую удельную выработку электрической энергии. Зная почасовую энергию среднего дня

и количество дней в месяце, легко найти удельную выработку электрической энергии ФЭТМ за месяц, а затем и за год.

Для повышения качества расчета и сокращения трудозатрат определение параметров ФЭТУ реализовано с помощью специально разработанного программного обеспечения на основе системы компьютерной математики MATLAB. При этом ранее представленная в разделе 2.5 математическая модель является ее частью и используется с небольшими изменениями в качестве подпрограммы, определяющей удельную выработку тепловой и электрической энергии. Кроме того автоматизирован также пересчет СИ, приходящего на различные приемные площадки. На основе данных прихода СИ программа способна рассчитывать приход на горизонтальную приемную площадку, на наклоненную к горизонту и постоянно ориентированную на солнце приемные площадки, а также апертуру концентратора с системой слежения.

Перспективность использования ФЭТУ оценим на примере двух географических точек: г. Краснодар и Московская область. Подробный расчет характеристик ФЭТУ покажем на примере г. Краснодара.

Приход СИ на горизонтальную поверхность в районе г. Краснодара [135], а также средняя дневная и ночная температура окружающей среды [136] представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Климатические данные г. Краснодар

Срок													
Месяц												Год	Сутки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Прямая составляющая солнечного излучения, приходящая на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2													
14,88	27,16	41,85	70,2	97,03	98,1	113,46	96,41	67,5	42,78	19,2	11,47	700,04	1,92
Рассеянная составляющая солнечного излучения, приходящая на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2													
23,25	29,96	50,53	55,5	75,33	77,4	76,26	67,89	54	38,75	25,8	20,15	594,82	1,63
Суммарное солнечное излучение, приходящее на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2													
38,13	57,12	92,38	125,7	172,36	175,5	189,72	164,3	121,5	81,53	45	31,62	1294,86	3,55
Средняя дневная температура воздуха, °С													
3,4	5,2	10,4	18,5	23,6	26,7	29,6	29,3	24,6	17,5	11,3	5,8	17,2	-

Использование автоматики управления сливом воды позволяет эксплуатировать ФЭТУ круглогодично при условии положительной дневной температуры окружающей среды. В случае снижения температуры окружающего воздуха ниже нуля автоматика останавливает работу ФЭТУ, предотвращая ее повреждения. В таком случае эксплуатация ФЭТУ осуществляется в месяцы, которые характеризуются положительной средней температурой за день. Таким образом, в районе г. Краснодар ФЭТУ будет эксплуатироваться круглогодично (таблица 4.2.).

Приемная площадка ФЭТМ и СК ориентируется раз в месяц по углу наклона, который определяется по формуле [2]:

$$\beta_{ФЭТМ\ и\ ТК} = \varphi - \delta_м \tag{4.11}$$

где φ – широта местности, °;

$\delta_м$ – угол склонения для заданного месяца, °.

Найденные согласно выражению (4.11) оптимальные месячные углы наклона ФЭТМ и СК сведены в таблицу 4.3. Пересчитанные в соответствии с этими углами значения приходящего СИ на наклоненную к горизонту и ориентированную строго на юг приемную площадку представлены в этой же таблице. Также приведены рассчитанные значения удельной выработки тепловой энергии ФЭТМ и СК. Отсутствие показателей для ФЭТМ за январь и декабрь, а для СК за декабрь указывают на то, что в эти месяцы в среднем условия эксплуатации установок не позволяют им нагреть воду до требуемой температуры. Таким образом, эффективное использование ФЭТУ в заданных условиях возможно в течение десяти месяцев эксплуатации.

Таблица 4.3 – Расчетные данные для г. Краснодар

Срок													
Месяц												Год	Сутки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Оптимальный угол наклона ФЭТМ и СК, °													
66,1	58,6	47,4	35,6	26,0	21,7	23,7	31,6	42,8	55,0	64,2	68,4	-	-
Суммарное солнечное излучение, приходящее на наклоненную к горизонту поверхность, кВт·ч/м^2													
59,04	81,13	106,79	134,52	174,02	174,24	190,04	171,88	140,09	111,04	68,59	50,08	1461,46	4,82 (4,00)
Удельная выработка тепловой энергии ФЭТМ ФЭТУ, кВт·ч/м^2													
-	6,39	17,45	45,91	79,30	88,51	107,44	96,08	65,58	35,11	7,12	-	548,89	1,81
Удельная выработка тепловой энергии СК ФЭТУ, кВт·ч/м^2													
-	19,41	31,28	53,11	80,16	83,72	97,81	86,64	64,53	42,04	15,73	-	574,41	1,90
Выработка тепловой энергии ФЭТМ ФЭТУ, кВт·ч													
-	9,10	24,86	65,40	112,94	126,06	153,02	136,85	93,40	50,0	10,15	-	781,78	2,58
Выработка тепловой энергии СК ФЭТУ, кВт·ч													
-	55,29	89,11	151,28	228,33	238,47	278,63	246,79	183,82	119,74	44,81	-	1636,26	5,40
Выработка тепловой энергии ФЭТУ, кВт·ч													
-	64,40	113,97	216,68	341,28	364,53	431,65	383,64	277,22	169,75	54,95	-	2418,06	7,98
Выработка электрической энергии ФЭТУ, кВт·ч/м^2													
-	13,47	17,56	21,79	27,91	27,78	30,13	27,26	22,42	18,02	11,26	-	217,60	0,72

Определив средние значения удельной выработки за год, получим согласно уравнениям (4.4, 4.5) удельную производительность нагретой жидкости ФЭТМ и СК, которые соответственно равны $G^{уд}_{ФЭТМ} = 30690$ л/год, $G^{уд}_{СК} = 19694$ л/год.

Учитывая среднюю температуру окружающей среды за десять месяцев эксплуатации ФЭТУ (таблица 4.1) из уравнения (4.1) получим, что требуемый объем горячей жидкости $G_{ФЭТУ} = 43357$ л/год.

Тогда согласно выражению (4.3) площадь ФЭТМ, необходимая для покрытия заданной нагрузки равна:

$$A'_{ФЭТМ} = \frac{G_{ФЭТУ}}{G^{уд}_{ФЭТМ}} = \frac{43357}{30690} = 1{,}4127 \text{ м}^2.$$

Поскольку площадь одного ФЭТМ равна 1,4243 м^2, то их количество будет равно единице. Площадь же СК с учетом выражения (4.3) будет равна:

$$A'_{ТК} = \frac{G^{уд}_{ФЭТМ}}{G^{уд}_{ТК}} \cdot A_{ФЭТМ} = \frac{19694}{43357} \cdot 1{,}4243 = 2{,}2195 \text{ м}^2.$$

Поскольку площадь одного СК равна 1,4243 м^2, то их количество будет равно двум. Таким образом окончательные площади установок равны $A_{ФЭТМ} = 1{,}42$ м^2, $A_{СК} = 2{,}85$ м^2.

Соответствующие этим площадям выработки тепловой энергии ФЭТМ и СК, а также суммарная – ФЭТУ, представлены в таблице 4.3.

Что касается фотоэлектрической части ФЭТМ, то установленная мощность фотоэлектрической панели равна: $P^{ном}_{ФЭП\,ФЭТМ} = 150$ Вт. Соответствующая этой мощности выработка электрической энергии ФЭТМ представлена в таблице 4.3.

4.2 Общие положения по оценке экономической эффективности фотоэлектрической тепловой установки

Принятие решения о целесообразности использования ФЭТУ осуществляется на основе результатов экономической оценки, характеризующих экономический потенциал проекта. Методология оценки эффективности проекта, принятая в работе, основывается на моделировании денежных потоков, включающих все связанные с осуществлением проекта денежные поступления и расходы за расчетный период [137, 138, 139].

Модель проекта, или денежных потоков проекта, относится к классу имитационных, она представляет собой набор формул для расчета притока и оттока денежных средств. Аналогично определению характеристик ФЭТУ расчет оценки ее экономической эффективности осуществляется с помощью специально реализованного программного обеспечения в системе компьютерной математики MATLAB. При этом расчетные части объединены в одну единую программу по оценке экономической эффективности проектов использования ФЭТУ.

Расчетный интервал проекта охватывает весь жизненный цикл эксплуатации установки – от начала вложения инвестиций до окончания ее эксплуатации. Для оценки ФЭТУ расчетный период принят равным ее сроку эксплуатации – 15 лет. Начало эксплуатации объекта 2014 г. Расчетный интервал разбивается на временные периоды – шаги, продолжительность которых равна одному году. В качестве базового момента времени принимается момент конца нулевого шага, т.е. год начала эксплуатации ФЭТУ.

Денежные потоки дисконтируются, т.е. их разновременные (относящие к разным шагам расчета) значения приводятся к их ценности на определенный период времени (момент приведения равный базовому моменту времени). Основным экономическим нормативом, используемым при дисконтировании, является норма дисконта (Е), выражаемая в процентах в

год. Норму дисконта примем Е=10%. Дисконтирование применяется к денежным потокам, выраженным в дефлированных ценах, что подразумевает приведение прогнозных цен (ожидаемых с учетом инфляции) к уровню цен фиксированного момента времени.

Отметим, что уровень инфляции в России за 2013 год составил 6,45 % [140]. В долгосрочной перспективе, учитывая прогноз Министерства экономического развития, ежегодный усредненный показатель инфляции в России должен составлять 5 % [141]. Поэтому в расчетах, исходя из долгосрочного срока эксплуатации объекта, примем темп общей инфляции за год завышенным на уровне 7 %.

Поскольку создание ФЭТУ связанно с долгосрочным вложением капитала, учет факта неравноценности одинаковых сумм поступлений или платежей, относящихся к разным периодам времени, имеет большое значение для их объективной оценки [142].

В рамках проводимого расчета экономической эффективности в качестве основных показателей определяются: чистый доход (ЧД); чистый дисконтированный доход (ЧДД); внутренняя норма доходности (ВНД); срок окупаемости; дисконтированный срок окупаемости; индекс доходности инвестиций (ИДИ); суммарные дисконтированные затраты.

Объективная оценка экономической эффективности проекта определяется системностью анализа, т.е. рассмотрением всего комплекса показателей. При этом наиболее значимым показателем, с учетом особенностей современного этапа развития экономики, значительной продолжительности реализации проекта и связанной с этим неопределенности исходной информации, считается срок окупаемости [137]. Следующим по значимости за этим показателем можно считать ВНД, так как этот показатель определяет запас «экономической устойчивости» проекта. Показатели чистого дисконтированного дохода и близкого к нему индекса доходности, которые предполагают оценку прибыльности проекта на протяжении всего расчетного периода, из-за неопределенности информации о будущих доходах и расходах используются, в первую очередь, для предварительной оценки проекта.

Определим экономическую эффективность использования ФЭТУ исходя из текущих цен на электрическую и тепловую энергию. При этом стоимость энергии определяется согласно способу ее получения: с использованием природного газа, дизельного топлива, электроэнергии (для получения тепла) и теплоцентрали. Поскольку ФЭТУ покрывает только часть тепловой нагрузки, экономическая оценка применения установки определяется исходя из сэкономленного ею топлива, т.е. на основе затрат обусловленных топливной составляющей.

Стоимость природного газа в г. Краснодар равна 5,05 руб./м^3 [143]. Удельный расход газа для производства 1 кВт·ч тепловой энергии составляет примерно 0,1 м^3, для электрической энергии – 0,26 м^3. Тогда топливная составляющая себестоимости тепловой энергии равна 0,51 руб./кВт·ч, электрической энергии – 1,31 руб./кВт·ч.

Стоимость дизельного топлива в г. Краснодар равна 26 руб./л. Удельный расход топлива для производства 1 кВт·ч тепловой энергии составляет примерно 0,1 л, для электрической

энергии – 0,27 л. Тогда топливная составляющая себестоимости тепловой энергии равна 2,6 руб./кВт·ч, электрической энергии – 7,02 руб./кВт·ч.

Стоимость электрической энергии в г. Краснодар равна 2,53 руб./кВт·ч. Для производства 1 кВт·ч тепловой энергии расходуется примерно 1,03 кВт·ч электрической. Тогда топливная составляющая себестоимости тепловой энергии равна 2,61 руб./кВт·ч.

Для жителей сельских населенных пунктов близ г. Краснодар тарифы на тепловую и электрическую энергию, отпускаемую теплоцентралями, равны 2415,74 руб./Гкал или 2,08 руб./кВт·ч и 2,53 руб./кВт·ч соответственно.

Подробный расчет экономической эффективности использования ФЭТУ рассмотрим на примере использования в качестве основного источника энергии дизельного топлива. Темп роста цен на первичные источники, исходя из анализа за последние несколько лет, принят равным 15 %. Используемое оборудование оценивается по рыночным ценам.

4.3 Оценка экономической эффективности фотоэлектрической тепловой установки

Для определения критериев экономической оценки различных вариантов ФЭТУ рассчитываются потоки платежей, генерируемые проектом.

Расчет капиталовложений. Капиталовложения в ФЭТУ складываются из стоимости входящих в нее энергоустановок и дополнительных расходов [144]. Годовые капиталовложения в течение всего расчетного периода определяются согласно выражению:

$$K_t = (1 + k_t^{доп} / 100) \cdot K_t^{э}, \tag{4.12}$$

где $k_t^{доп}$ – дополнительные расходы для энергообъекта, отнесенные к его стоимости в год t, %. Дополнительные расходы складываются из транспортировки, монтажных и пусконаладочных работ и прочих непредвиденных затрат.

$K_t^{э}$ – капиталовложения, обусловленные энергоустановками в год t:

$$K_t^{э} = K_{ФЭТМ\,t}^{ФЭТУ} + K_{СК\,t}^{ФЭТУ} + K_{АБ\,t} + K_{ЗР\,АБ\,t} + K_{И\,t} + K_{АСУК\,t} + K_{тобм\,t} + K_{ТиА\,t}, \tag{4.13}$$

где $K_{ФЭТМ\,t}^{ФЭТУ}$ – капиталовложения, обусловленные ФЭТМ ФЭТУ в год t, руб.

Определяются как сумма капиталовложений на обычные ФЭМ и СК соответствующих площадей:

$$K_{ФЭТМ\,t}^{ФЭТУ} = K_{ФЭМ\,t} + K_{СК\,t}, \tag{4.14}$$

$K_{СК\,t}^{ФЭТУ}$ – капиталовложения, обусловленные СК ФЭТУ в год t, руб.;

$K_{АБ\,t}$ – капиталовложения, обусловленные АБ в год t, руб.;

$K_{ЗР\,АБ\,t}$ – капиталовложения, обусловленные DC-DC преобразователем в год t, руб.;

$K_{Иt}$ – капиталовложения, обусловленные инвертором в год *t*, руб.;

$K_{АСУКt}$ – капиталовложения, обусловленные АСУК в год *t*, руб;

$K_{тобмt}$ – капиталовложения, обусловленные баком-аккумулятором в год *t*, руб;

$K_{ТиАt}$ – капиталовложения, обусловленные трубопроводом и арматурой в год *t*, руб.

Отметим, что, поскольку ФЭТМ представляет собой одно единое устройство, объединяющее в себе ФЭМ и СК соответствующих площадей, его реальная стоимость будет несколько ниже простой суммы их стоимостей. Себестоимость ФЭТМ будет ниже, поскольку в модуле отсутствуют некоторые элементы, входящие в состав обычных ФЭМ и СК (к примеру напыление на тепловой абсорбер), а некоторые есть и в СК, и в ФЭМ (светопрозрачное покрытие). DC-DC преобразователь помимо отбора максимума возможной мощности при наличии АБ выполняет также функцию зарядного устройства.

Исходя из того, что срок эксплуатации АБ, DC-DC преобразователя, инвертора и АСУК меньше расчетного срока службы ФЭТУ, необходима периодическая замена отслужившего свой срок оборудования. При этом учитывать эти капиталовложения необходимо с учетом инфляции. Тогда стоимость элемента ФЭТУ в год *t* определиться, исходя из выражения:

$$K_{э\,t} = K_{э\,0}(1 + E_{инф}/100)^t, \tag{4.15}$$

где $K_{э\,0}$ – стоимость элемента ФЭТУ (АБ, DC-DC преобразователя, инвертора, АСУК) на момент начала эксплуатации, руб.;

$E_{инф}$ – годовая инфляция, %.

Используемые для определения капиталовложений данные сведены в таблицу 4.4

Таблица 4.4 – Данные (вводные), используемые при определении капиталовложений при осуществлении электроснабжения потребителя, расположенного в районе г. Краснодар

Параметр	**Значение**
Расчетный период эксплуатации энергообъекта, лет	15
Норма дисконта в год, %	10
Темп инфляции в год, %	7
Удельная стоимость 1 Вт установленной мощности ФЭП ФЭТМ ФЭТУ, руб./Вт	55
Мощность ФЭМ ФЭТМ ФЭТУ, Вт	150
Срок службы ФЭМ ФЭТМ ФЭТУ, лет	15
Удельная стоимость 1 м^2 СК ФЭТМ ФЭТУ, руб./м^2	7 000
Площадь ФЭТМ ФЭТУ, м^2	1,42
Удельная стоимость СК ФЭТУ, руб./м^2	7 000
Площадь СК ФЭТУ, м^2	2,85
Стоимость АБ, руб./шт.	4 000
Количество АБ, 40 А·ч	1
Срок службы АБ, шт., лет	10
Стоимость DC-DC преобразователя, руб./шт.	2 000
Количество DC-DC преобразователей, шт.	1
Срок службы DC-DC преобразователя, лет	10
Стоимость инвертора (DC-AC преобразователя), руб./шт.	2 000
Количество инверторов, шт.	1

Параметр	Значение
Срок службы инвертора, лет	10
Стоимость АСУК, руб.	2 000
Количество АСУК, шт.	1
Срок службы АСУК, лет	10
Стоимость бака-аккумулятора, руб./шт.	6 000
Количество бака-аккумулятора, шт.	1
Срок службы бака-аккумулятора, лет	15
Затраты на трубопровод и арматуру, руб.	6 000
Расходы на транспортировку (отнесенные к стоимости энергообъекта), %	0
Расходы на монтажные и пусконаладочные работы (отнесенные к стоимости энергообъекта), %	0
Прочие и непредвиденные затраты (отнесенные к стоимости энергообъекта), %	0

Результат расчета капиталовложений по годам в энергообъект (ФЭТУ) за весь расчетный период представлен в таблице 4.5.

Эксплуатационные издержки. Издержки, связанные с эксплуатацией энергообъекта как устройства, в общем случае, могут включать в себя издержки на капитальный и текущий ремонты, на заработную плату работников и прочее:

$$И_t^{эксп л} = И_t^{к.р} + И_t^{т.р} + И_t^{зар.пл} + И_t^{топл} + И_t^{пр}. \quad (4.16)$$

Однако особенности ФЭТУ таковы, что при ее функционировании практически отсутствуют эксплуатационные затраты. ФЭТУ представляет собой техническое устройство практически не требующее вмешательства человека, ремонта, а также использования циркуляционного насоса в силу естественной циркуляции теплоносителя и благодаря разноуровневому расположению некоторых узлов установки.

Таблица 4.5 – Капиталовложения по годам в энергообъект за весь расчетный период при реализации энергоснабжения потребителя, расположенного в районе г. Краснодар

Вид	Капиталовложения по годам, тыс.руб.							
	2013 (0)	2014 (1)	2015 (2)	2016 (3)	2017 (4)	2018 (5)	2019 (6)	2020 (7)
дефлированные	60,0	0	0	0	0	0	0	0
дисконтированные	60,0	0	0	0	0	0	0	0
	2021 (8)	2022 (9)	2023 (10)	2024 (11)	2025 (12)	2026 (13)	2027 (14)	2028 (15)
дефлированные	0	0	10,0	0	0	0	0	0
дисконтированные	0	0	3,9	0	0	0	0	0

Таким образом, результаты расчета издержек энергообъекта по годам за весь расчетный период будут равны нулю.

Ликвидная стоимость объекта, которая равна суммарным капиталовложениям в энергообъект за вычетом суммарных амортизационных издержек, определяется следующим образом:

$$K_{лик\,t} = \sum_{t=0}^{Tp} K_t - \sum_{t=0}^{Tp} И_t^{ам}. \quad (4.17)$$

В результате дефлированная ликвидная стоимость составит 3 565 руб., дисконтированная ликвидная стоимость – 853 руб.

Поток прибыли. Годовой поток прибыли находится, исходя из объемов реализованной продукции (электрической и тепловой энергии) и тарифа на нее за соответствующие периоды времени *t*:

$$П_t = О_{Эt} \cdot Ц_{Эt} + О_{Тt} \cdot Ц_{Тt} \quad (4.18)$$

где $О_{Эt}$ – объемы реализованной электрической энергии в год *t*, кВт·ч;

$Ц_{Эt}$ – тариф на электрическую энергию в год t, руб./кВт·ч;

$О_{Тt}$ – объемы реализованной тепловой энергии в год *t*, кВт·ч;

$Ц_{Тt}$ – тариф на тепловую энергию в год t, руб./кВт·ч.

Поток прибыли, а, следовательно, и экономическая оценка ФЭТУ определяется на основе цен на тепловую и электрическую энергию, полученную с использованием различных ранее представленных первичных источников. Количество реализуемой электрической энергии ФЭТУ за год равно: 218 кВт·ч, тепловой – 2 418 кВт·ч.

Результат расчета годового потока прибыли от энергообъекта согласно соответствующим первичным источникам за весь расчетный период, основанный на темпе роста цен на дизельное топливо, представлен в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Поток прибыли по годам от энергообъекта, соответствующий использованию дизельного топлива, за весь расчетный период

Вид	Поток прибыли по годам при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива, тыс.руб.							
	2013 (0)	2014 (1)	2015 (2)	2016 (3)	2017 (4)	2018 (5)	2019 (6)	2020 (7)
Дефлированный	0	8,40	9,03	9,70	10,43	11,21	12,05	12,95
дисконтированный	0	7,64	7,46	7,29	7,12	6,96	6,80	6,65
	2021 (8)	2022 (9)	2023 (10)	2024 (11)	2025 (12)	2026 (13)	2027 (14)	2028 (15)
Дефлированный	13,92	14,96	16,08	17,28	18,57	19,96	21,45	23,05
Дисконтированный	6,49	6,34	6,20	6,06	5,92	5,78	5,65	5,52

Показатели экономической эффективности. Определив дефлированное и дисконтированное сальдо потока (таблица 4.7), найдем показатели экономической эффективности проекта (таблица 4.8).

Как видно из показателей экономической эффективности, при наличии природного газа применение ФЭТУ нерентабельно. Потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта составляет 43 981 руб. При этом полученная себестоимость энергии показывает, что в окупаемость ФЭТУ данном случае настанет при цене на газ 16,97 руб./м^3.

Таблица 4.7 – Сальдо суммарного и накопленного потока, соответствующее использованию дизельного топлива

Вид	Сальдо суммарного потока при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива, тыс.руб.							
	2013 (0)	2014 (1)	2015 (2)	2016 (3)	2017 (4)	2018 (5)	2019 (6)	2020 (7)
дефлированный	-60,00	8,40	9,03	9,70	10,43	11,21	12,05	12,95
дисконтированный	-60,00	7,64	7,46	7,29	7,12	6,96	6,80	6,65
	2021 (8)	2022 (9)	2023 (10)	2024 (11)	2025 (12)	2026 (13)	2027 (14)	2028 (15)
дефлированный	13,92	14,96	6,08	17,28	18,57	19,96	21,45	26,62
дисконтированный	6,49	6,34	2,34	6,06	5,92	5,78	5,65	6,37
	Сальдо накопленного потока при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива, тыс.руб.							
	2013 (0)	2014 (1)	2015 (2)	2016 (3)	2017 (4)	2018 (5)	2019 (6)	2020 (7)
дефлированный	-60,00	-51,59	-42,56	-32,86	-22,43	-11,22	0,83	13,78
дисконтированный	-60,00	-52,36	-44,89	-37,60	-30,48	-23,52	-16,72	-10,07
	2021 (8)	2022 (9)	2023 (10)	2024 (11)	2025 (12)	2026 (13)	2027 (14)	2028 (15)
дефлированный	27,70	42,66	48,73	66,01	84,58	104,54	125,99	152,61
дисконтированный	-3,58	2,76	5,11	11,16	17,08	22,86	28,51	34,88

В остальных же случаях применение ФЭТУ оправдано и дает положительный эффект. Наилучший эффект от ФЭТУ наблюдается при использовании совместно с таким первичным источником как дизельное топливо. График, характеризующий денежные потоки во времени, представлен на рисунке 4.1. Из графика наглядно видно, что срок окупаемости ФЭТУ при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива, наступит на девятом году эксплуатации.

Таблица 4.8 – Показатели экономической эффективности ФЭТУ (выводные данные), соответствующие рассматриваемым первичным источникам, при определении прогнозируемых цен на основе темпа роста

Экономический показатель	г. Краснодар	Московская область
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих использованию природного газа		
Чистый доход (ЧД), руб.	-	-
Простой срок окупаемости ($Т_{окп}$), лет	-	-
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	-	-
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	-	-
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	-	-
Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДДИ), о.е.	-	-
Суммарные дисконтированные затраты ($З_{д}$), руб.	-	-
Потребность в дополнительном финансировании (ПФ), руб.	23 874	54 406
Потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта (ДПФ), руб.	43 981	73 156
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	4,34	5,74
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,69	2,24
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

Экономический показатель	г. Краснодар	Московская область
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива		
Чистый доход (ЧД), руб.	152 610	145 344
Простой срок окупаемости ($Т_{окп}$), лет	5,9	12,5
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	34 882	16 103
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	17,5	12,6
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	8,6	7,5
Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДДИ), о.е.	1,55	1,18
Суммарные дисконтированные затраты ($З_{д}$), руб.	63 851	91 931
Потребность в дополнительном финансировании (ПФ), руб.	-	-
Потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта (ДПФ), руб.	-	-
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	4,52	5,97
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,67	2,21
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
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих использованию электрической энергии		
Чистый доход (ЧД), руб.	125 860	130 265
Простой срок окупаемости ($Т_{окп}$), лет	6,6	7,9
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	22 929	9 365
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	15,1	11,5
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	10,6	13,5
Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДДИ), о.е.	1,36	1,10
Суммарные дисконтированные затраты ($З_{д}$), руб.	63 851	91 931
Потребность в дополнительном финансировании (ПФ), руб.	-	-
Потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта (ДПФ), руб.	-	-
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	1,85	2,55
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,91	2,62
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
Показатели экономической эффективности при ценах, соответствующих тарифам теплоцентрали		
Чистый доход (ЧД), руб.	89 951	48 797
Простой срок окупаемости ($Т_{окп}$), лет	7,7	11,8
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	6 883	-
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	11,63	-
Дисконтированный срок окупаемости ($Т_{ок.д}$), лет	13,5	-
Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДДИ), о.е.	1,11	-
Суммарные дисконтированные затраты ($З_{д}$), руб.	63 851	91 931
Потребность в дополнительном финансировании (ПФ), руб.	-	-
Потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта (ДПФ), руб.	-	27 040
Себестоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	2,28	4,00
Себестоимость тепловой энергии, руб./кВт·ч	1,88	2,45
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

На рисунках 4.2 и 4.3 представлены графики, характеризующие экономическую эффективность применения ФЭТУ при различных ценах, соответствующих использованию

дизельного топлива. Представленные графики наглядно показывают, как изменяется эффективность применения ФЭТУ, осуществляющей энергоснабжение потребителя, расположенного вблизи г. Краснодар, при различных начальных ценах на продукцию. Например, в случае использования ФЭТУ совместно с дизель-генераторной установкой при стоимости тепловой энергии 5 руб./кВт·ч – ЧДД = 125 000 тыс.руб.; $T_{ок.д}$ = 4,2 лет. В целом, графики позволяют оценить влияние текущих цен на реализуемость проекта.

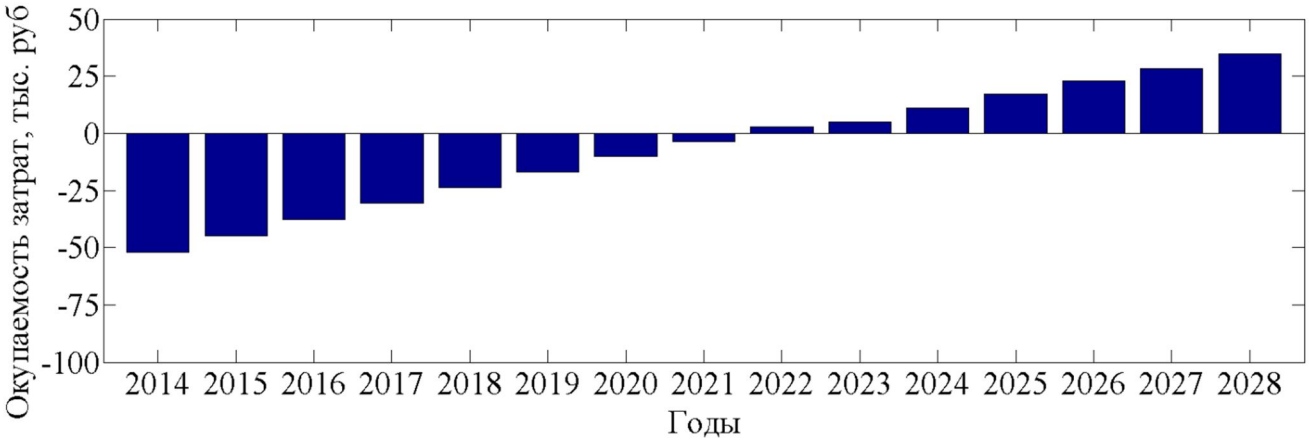


Рисунок 4.1 – График окупаемости капиталовложений для ФЭТУ при ценах, соответствующих использованию дизельного топлива

В таблице 4.8 также представлены показатели экономической эффективности применения ФЭТУ в условиях Московской области. Как и ожидалось, в силу менее благоприятных условий эксплуатации во второй географической точке, эти показатели хуже. И все же, в условиях средней полосы России, которой соответствует Московская область, использование ФЭТУ совместно с такими первичными источниками как дизельное топливо и электрическая энергия, оказалось выгодным.

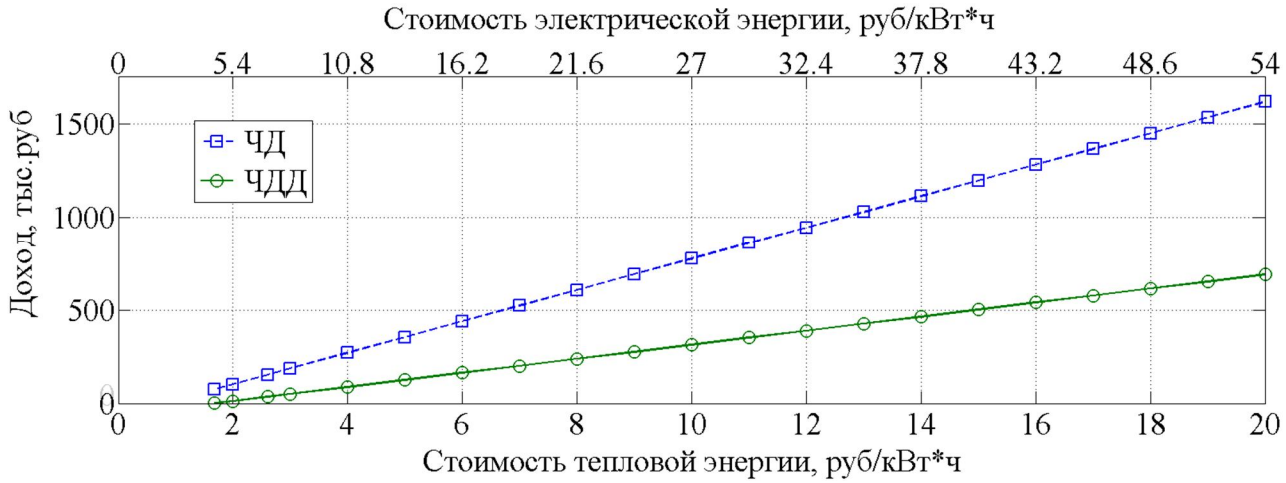


Рисунок 4.2 – График, характеризующий изменение доходов от применения ФЭТУ при различных начальных ценах, соответствующих использованию дизельного топлива

В свою очередь, применение ФЭТУ совместно с теплоцентралью находиться на грани окупаемости, потребность в дополнительном финансировании с учетом дисконта составляет 27 040 руб. Таким образом, в южных районах России внедрение данного типа установок экономически целесообразно уже сейчас, и, что особенно важно, при использовании совместно с теплоцентралью. В средней полосе России повсеместное использование ФЭТУ находится на грани рентабельности, что позволяет рассчитывать на скорую окупаемость в будущем и для этих широт.

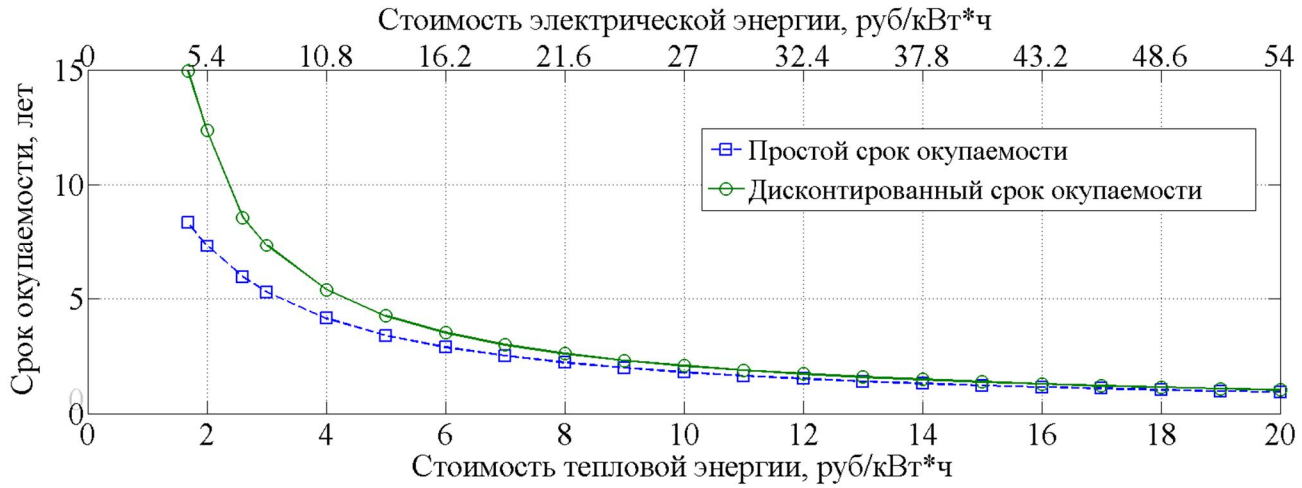


Рисунок 4.3 – График, характеризующий изменение срока окупаемости ФЭТУ при различных начальных ценах, соответствующих использованию дизельного топлива·

Показатели экономической эффективности использования ФЭТУ наглядно демонстрируют целесообразность комбинации в одном устройстве ФЭП и СК. Помимо энергоснабжения потребителя, такого рода установка позволяет обеспечить конкурентоспособные в сравнении с традиционным энергоснабжением цены на энергию, а, следовательно, способствует развитию более дорогих технологий фотоэлектричества. Так в условиях г. Краснодара себестоимость получения отдельно электрической энергии (т.е. себестоимость электрической энергии, получаемой за счет отдельных ФЭМ) равна 6,86 руб./кВт·ч., себестоимость получения отдельно тепловой энергии (т.е. себестоимость тепловой энергии, получаемой за счет отдельных СК) равна 1,46 руб./кВт·ч. В свою очередь, себестоимость электрической и тепловой энергии, получаемой с помощью комбинированной установки, равны 4,52 и 1,67 руб./кВт·ч. Данные показатели получены исходя из соотношения стоимости электрической и тепловой энергии на примере дизельного топлива, а также объемов выработки ФЭТУ. Таким образом видно, что тепловая составляющая себестоимости компенсирует более дорогую электрическую, в частности за счет объема тепловой энергии.

4.4 Выводы по главе

1. Выработан подход определения оптимальных площадей фотоприемников ФЭТМ и СК в составе ФЭТУ, исходя из текущих условий эксплуатации и характеристик используемого оборудования.

2. Создано программное обеспечение, реализующее выработанный подход определения оптимальных площадей и позволяющее быстро и качественно рассчитать эти показатели, а также экономические показатели различного рода ФЭТУ.

3. Энергоснабжение потребителя, расположенного в районе г. Краснодар и Московской области, за счет ФЭТУ является экономически выгодным при использовании совместно с такими первичными источником энергии, как дизельное топливо и электрическая энергия. Применение установки совместно с теплоцентралью рентабельно только для первой географической точки.

4. Для южных регионов России уже в настоящее время экономически эффективно применение ФЭТУ при повсеместном использовании совместно с теплоцентралью, чистый дисконтированный доход равен 6 883 руб., дисконтированный срок окупаемости – 13,5 лет., себестоимость электрической и тепловой энергии – 2,28 и 1,88 руб./кВт·ч соответственно.

5. Комбинирование в одном устройстве ФЭП и солнечного коллектора компенсирует стоимость электрической энергии за счет более дешевой тепловой. Так себестоимость отдельно тепловой и электрической энергии составляет 6,86 и 1,46 руб./кВт·ч соответственно, а себестоимость энергии при использовании ФЭТУ 4,52 и 1,67 руб./кВт·ч, с учетом соотношения стоимости электрической и тепловой энергии на примере дизельного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное диссертационное исследование показало возможность работы солнечной когенерационной установки на основе ФЭТМ по принципиально отличающейся от традиционных для СК схеме с разомкнутым контуром циркуляции теплоносителя и с электромагнитным клапаном, контролирующим поток теплоносителя через модуль. При этом функционирование ФЭТМ согласно разработанной схеме позволяет повысить технические характеристики гелиоустановки на основе ФЭТМ в сравнении установками с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя.

По результатам выполненной работы были сделаны следующие 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 счет 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.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБ – аккумуляторная батарея;

АМ – атмосферная масса;

АСУК – автоматическая система управления и контроля;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ВНД – внутренняя норма доходности;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ДГУ – дизель-генераторная установка;

ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство;

ИДЗ – индекс доходности затрат;

ИДИ – индекс доходности инвестиций;

КПД – коэффициент полезного действия;

СБ – солнечная батарея;

СИ – солнечное излучение;

СК – солнечный коллектор;

СР – солнечная радиация;

СЭ – солнечный элемент;

ТН – тепловой насос;

ТНУ – теплонасосная установка;

УСД – устройство сбора данных;

ФЭ – фотоэлектрический;

ФЭМ – фотоэлектрический модуль;

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;

ФЭТ – фотоэлектрический тепловой;

ФЭТМ – фотоэлектрический тепловой модуль;

ФЭТУ – фотоэлектрическая тепловая установка;

ФЭУ – фотоэлектрическая установка;

ЧД – чистый доход;

ЧДД – чистый дисконтированный доход;

AC – (англ., alternating current*)* переменный ток;

DC – (англ., direct current*)* постоянный ток;

USB – (англ., Universal Serial Bus) последовательный интерфейс передачи данных;

FF – (англ., Fill Factor) коэффициент заполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МДС-13-12.2000. Методические рекомендации по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства / под редакцией В.М. Локтионова. М., 1999.

2. Стребков Д.С. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264 с.

3. X-SERIES SOLAR PANELS. SunPower. URL: http://us.sunpower.com/homes/products-services/solar-panels/x-series/ (дата обращения: 23.06.2013).

4. Green M., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. Solar cell efficiency tables // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2012. V. 20. P. 12-20.

5. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых. Минск: Центр БГУ, 2007. 222 с.

6. Photovoltaic Cells. ITACA. URL: http://www.itacanet.org/a-guide-to-photovoltaic-panels/photovoltaic-pv-cells (дата обращения: 25.06.2013).

7. Solar Energy Perspectives / International Energy Agency. Paris, France, 2011. 234 p. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives 2011.pdf (дата обращения: 13.11.2013).

8. Solar Market Research and Analysis. Solar Energy Market Growth. URL: http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/markets-growth/market-growth (дата обращения: 13.11.2013).

9. Strong Growth Forecast for Solar PV Industry in 2014 with Demand Reaching 49 GW, According to NPD Solarbuzz. URL: http://www.solarbuzz.com/news/recent-findings/strong-growth-forecast-solar-pv-industry-2014-demand-reaching-49-gw (дата обращения: 13.11.2013).

10. Global market for residential and commercial solar thermal technologies. BCC Research LLC. URL: http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/EGY069A (дата обращения: 24.06.2013).

11. WBGU – German Advisory Council on Global Change: Towards Sustainable Energy Systems / Berlin, Heidelberg, New York: Springer., 2003.

12. Hevel solar. О солнечной энергии. URL: http://www.hevelsolar.com/solar (дата обращения: 13.11.2013).

13. Тарнижевский Б.В. Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России // Теплоэнергетика. 1996. № 2. С. 15-18.

14. Тарнижевский Б.В. Технические и экономические аспекты использования солнечной энергии в России // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 1997. № 2.

15. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. 292 с.

16. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 148 с.

17. Buresch M. Photovoltaic Energy Systems: Design and Installation. New York: McGraw-Hill, 1983. 336 c.

18. Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения // Физическая инженерия поверхности. 2010. Вып 8. № 2. С. 100-115.

19. Skoplaki E., Palyvos J. Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations // Renew Energy. 2009. № 34. P. 23-29.

20. Skoplaki E., Palyvos J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. 2009. № 83. P. 614-624.

21. Fraisse G., Ménézo C., Johannes K. Fraisse G., Menezo C., Johannes K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type // Sol Energy. 2007. № 81. V. 11. P. 1426-1438.

22. The Multi Solar System (PVT). Millennium Electric. URL: http://www.millenniumsolar.com/default.asp?catid= (дата обращения: 25.06.2013).

23. PV Thermal (PVT) Module. Helios Photovoltaic. URL: http://www.helios-pv.com/en/products/pv-thermal/ (дата обращения: 25.06.2013).

24. Photo-Thermal and Photovoltaic Composite Module. Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. URL: http://ru.made-in-china.com/co_sye750/product_Photo-Thermal-and-Photovoltaic-Composite-Module-Anjia01-_hesogyeiy.html (дата обращения: 27.06.2013).

25. PV-T Hybrid Collectors. Solimpeks Solar Energy Corp. URL: http://www.solimpeks.com/pv-t-hybrid-collectors (дата обращения: 27.06.2013).

26. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240. SUNSYSTEM. URL: http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T (дата обращения: 27.06.2013).

27. Гибридные солнечные коллекторы (PV/T). ALTENERGO. URL: http://www.altenergo.lv/ru/prods/SolarCollectors/Hybride (дата обращения: 27.06.2013).

28. Affolter P., Eisenmann W., Fechner H., Rommel M., Schaap A., Sørensen H., Tripanagnostopoulos Y., Zond H. PVT ROADMAP, A European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Energy Research Centre of the Netherlands, 2006.

29. Helio Dynamics. URL: http://www.heliodynamics.com/index.htm (дата обращения: 02.09.2013).

30. A new dawn for solar energy. Absolicon-solar collector. URL: http://www.absolicon.com (дата обращения: 02.08.2013).

31. Инновационные проекты ГНУ ВИЭСХ: каталог / Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. М., 2012. 200 с.

32. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. 315 с.

33. Шадрин В.И. Автономные солнечные установки с концентраторами солнечного излучения // Лазерно-оптические системы и технологии: сб. статей ФГУП НПО АСТРОФИЗИКА. М., 2009. С. 89-94.

34. Тюхов И.И., Тихонов П.В., Тихонов А.В. Состояние и перспективы когенерационных фотоэлектрических-тепловых систем // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: сб. трудов МНПК. Новосибирск, 2009. С. 268-273.

35. Tyukhov I., Simakin V., Smirnov A., Poulek V. Combined pv/t system based on concentrator with vertical p-n junctions solar cells // Concentrating photovoltaic optics and power. URL: http://www.concentrating-pv.org/darmstadt2009/pdf/papers/25-TyukhovEtAl-PvThermal.pdf (дата обращения: 29.06.2013).

36. 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).

37. Ji J., Pei G., Chow T., Liu K., He H., Lu J., Han C. Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system // Solar energy. 2008. № 82. P. 43-52.

38. Wolf M. Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences // Energy Convers. 1976. № 16. P. 79-90.

39. Kern J., Russell M. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector // Proceedings of the 13th IEEE photovoltaic specialists. Washington, USA, 1978. P. 1153-1157.

40. Hendrie S.D. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors // Proceedings of the ISES international congress. Atlanta, USA, 1979. № 3. P. 1865-1869.

41. Garg H.P., Agarwal R.K. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells // Energy Convers Manage. 1995. № 36 (2). P. 87-99.

42. Garg H.P., Agarwal R.K. Study of a photovoltaic-thermal system-thermosyphonic solar water heater combined with solar cells // Energy Convers Manage. 1994. № 35 (7). P. 605-620.

43. Garg H.P., Agarwal R.K., Joshi J.C. Experimental study on a hybrid photovoltaic-thermal solar water heater and its performance predictions // Energy Convers Manage. 1994. № 35 (7). P. 621-633.

44. Prakash J. Transient analysis of a photovoltaicthermal solar collector for cogeneration of electricity & hot air/water // Energy Convers Manage. 1994. № 35 (11). P. 967-972.

45. Bergene T., Lovvik O. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells // Solar Energy. 1995. № 55. P. 453-462.

46. De Vries D.W. Design of a photovoltaic/thermal combi-panel: Ph.D. Thesis / Eindhoven Technical University. Netherland, 1998.

47. Fujisawa T., Tani T. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector // Sol Energy Mater Sol Cells. 1997. № 47 (1-4). P. 135-148.

48. Norton B., Edmonds J. Aqueous propylene-glycol concentrations for the freeze protection of thermosyphon solar energy water heaters // Solar Energy. 1991. № 47. P. 375-382.

49. Al Harbi Y., Eugenio N., Al Zahrani S. Photovoltaic-thermal solar energy experiment in Saudi Arabia // Renew Energy. 1998. № 15. P. 483-486.

50. Камилов А.Г., Муминов Р.А., Турсунов М.Н. Оценка эффективности системы солнечного элемента и коллектора в услових жаркого климата // Гелиотехника. 2008. № 2. С. 32-35.

51. Kalogirou S.A. Use of TRNSYS for modeling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus // Renew Energy. 2001. № 23. P. 247-260.

52. Kalogirou S., Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production // Energy Convers Manage. 2006. № 47 (18-19). P. 3368-3382.

53. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model // Solar Energy. 2002. № 72 (1). P. 63-73.

54. Zakharchenko R., Licea-Jime'nez L., Pe'rez-Garci'a SA, Vorobeiv P., Dehesa-Carrasco U., Pe'rez-Robels JF., et al. Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system // Sol Energy Mater Sol Cells. 2004. № 82 (1-2). P. 253-261.

55. Dubey S., Tiwari G. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater // Solar Energy. 2008. № 82. P. 602-612.

56. Турсунов М.Н., Муминов Р.А., Газиев У.Х., Сеттарова З.С., Тукфатуллин О.Ф. Разработка фотоэлектрической установки для работы в условиях жаркого климата // Гелиотехника. 2006. № 3. С. 13-17.

57. Турсунов М.Н., Комилов А., Клычев Ш.И., Мухаммадиев С.М. Эффективность комбинированных фототепловых солнечных установок // Гелиотехника. 2008. № 3. С. 19-22.

58. Мирзабаев М., Мирзабаев А.М., Кононеров В.П., Турсунов М.Н., Тукфатуллин О.Ф. Фототеплопреобразовательные установки с кремниевыми солнечными элементами // Гелиотехника. 2007. № 2. С. 17-21.

59. Saitoh H., Hamada Y., Kubota H., Nakamura M., Ochifuji K., Yokoyama S., et al. Field experiments and analysis on a hybrid solar collector // Appl Therm Eng. 2003. №23. P. 2089-2105.

60. Chow T., Pei G., Fong K., Lin Z., Chan A., Ji J. Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover // Appl Energy. 2009. № 86 (3). P. 310-316.

61. Chow T., Chan A., Fong K., Lin Z., He W., Ji J. Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application // Applied Energy. 2009. № 86 (5). P. 689-696.

62. Ji J., Han J., Chow T., Yi H., Lu J., He W., Sun W. Effect of fluid flow and packing factor on energy performance of a wall-mounted hybrid photovoltaic/water-heating collector system // Energy & Buildings. 2006. № 38 (12). P. 1380-1387.

63. 63. Ji J., Lu J., Chow T., He W., Pei G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation // Applied Energy. 2007. №84 (2). P. 222-237.

64. Dubey S., Tiwari G. Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series // Solar Energy. 2009. № 83 (9). P. 1485-1498.

65. Tiwari A., Dubey S., Sandhu G., Sodha M., Anwar S. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes // Appl Energy. 2009. № 86. P. 2592-2597.

66. Кувшинов В.В., Сафонов В.А. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. Вып. 3. Севастополь, 2009. С. 158-163.

67. Кувшинов В.В. Комбинированные солнечные установки для выработки тепловой и электрической энергии // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. Вып. 2. Севастополь, 2010. С. 182-190.

68. Zondag H.A., deVries D.W., van Helden W.G.J., van Zolengen R.J.C., Steenhoven A.A. The yield of different combined PV-thermal collector designs // Solar Energy. 2003. № 74 (3). С. 253-269.

69. Кадыров Ч.А. Повышение энергетической эффективности систем тепло и электроснабжения объектов Кыргызстана на основе солнечных гибридных коллекторов: дис. канд. техн. наук: 05.14.04 / Моск. энергет. ин-т. Москва, 2011. 135 с.

70. Bakker M., Zondag H.A., van Helden W.G.J. Demonstration on a dual flow photovoltaic/thermal combi panel // Proceedings of PV in Europe—From PV Technology to Energy Solutions Conference and Exhibition: Book of Abstract. Rome, 2002.

71. Hendrie S.D., "Photovoltaic/thermal Collector Development Program—Final Report," Lincoln laboratory, Report MIT 1982.

72. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.

73. Губарев В.В. Системный анализ в экспериментальных исследованиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. 99 с.

74. Хачатурова С.М. Математические методы системного анализа: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 124 с.

75. Численные методы. URL:http://slogos.ru/story/chislennye_metody.html# (дата обращения: 03.07.2013).

76. Florschuetz L.W. Extension of the Hottel–Whiller model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors // Sol Energy. 1979. №22(4). P. 361–366.

77. Zondag H.A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C., Van Steenhoven A.A. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector // Sol Energy. 2002. №72(2). P. 113–128.

78. Hottel H.C., Willier A. Evaluation of flat-plate solar collector performance // Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy: V. 2. Tucson, Arizona, 1958.

79. Dufflie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of Thermal Processes: second ed. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991. 919 p.

80. Agarwal R.K., Garg H.P. Study of a photovoltaic-thermal system—thermosyphonic solar water heater combined with solar cells // Energy Convers Manage. 1994. №35(7). P. 605–620.

81. Chow T.T. Performance analysis of photovoltaic–thermal collector by explicit dynamic model // Solar Energy. 2003. №75(2). P. 143-152.

82. Chow T.T., He W., Ji J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application // Sol Energy. 2006. №80(3). P. 298-306.

83. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets // Solar Energy. 1983. №30(6). P. 563-573.

84. 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.

85. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент: пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с.

86. Андреев В.М., Грилихес В.А, Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.

87. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике, Том 1. 2-е изд., испр. М.: Айрис-пресс, 2003. 288 с.

88. Никитин Б.А., Гусаров В.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью 1000 Вт/м^2 и оценка на его основе ожидаемых характеристик

кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2008-2009. №24-25. С. 50-60.

89. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. 280 с.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

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

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. 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.

102. Diaf S, Diaf D, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system // Energy Policy. 2007. V. 35. P. 5708-5718.

103. Теплопроводный клей АлСил-5. URL: http://www.kurskline.ru/catalog/ coolers/44384 (дата обращения: 08.07.2013).

104. Аэрозоль изолирующий Scotch 1601 (1602, 1603). URL: http://formos.ru/ produkciya/mufty_kompaundy_izolenta_trubki_specialnye_lenty_i_drugie_materialy_zm/elektrotehnicheskie_aerozoli_scotch/aerozol_izoliruyuwij_scotch_1601_1602_1603/ (дата обращения: 02.10.2013).

105. Технические характеристики вспененного полиэтилена.ISOLUX group. URL: http://www.tsstrade.ru/catalogue/insulation/polietilen/teplofol/ (дата обращения: 06.07.2013).

106. Сендвич-панели ПВХ. URL: http://www.tk-pragma.ru/index.php?page=prod&pid=100018 (дата обращения: 06.07.2013).

107. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М: Издат-тво МЭИ, 2005. 550 с.

108. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: пер. с англ. М: Мир, 1977. 410 с.

109. Коэффициенты излучения и поглощения материалов URL: http://www.svasti.ru/koefficienty_izlucheniya_i_pogloscheniya_materialov (дата обращения: 06.07.2013).

110. Hollands K.G.T., Unny T.E., Raithby G.D., Konicek L. Free convective heat transfer across inclined air layers // International journal of Heat and Mass Transfer. 1976. V. 98. P. 189-193.

111. 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.

112. ANSYS. URL: http://www.ansys.com/ (дата обращения: 05.02.2013).

113. Охорзина А.В., Китаева М.В., Юрченко А.В., Скороходов А.В. Системы слежения за солнцем с применением ФЭД // Ползуновский вестник. 2012. №2/1. С. 213-217.

114. 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.

115. Стребков Д.С., Тихомиров А.В., Харченко В.В.. Проект энергетической стратегии сельского хозяйства России (The project of Power Strategy of Agriculture of Russia) // Техника и оборудование для села. 2009. №2 . С. 12-15.

116. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. URL: http:// www.cpnt.ru/userfiles/files_normativ_energosafe_energostrategy.pdf (дата обращения: 08.06.2013).

117. Энергетическая стратегия сельского хозяйства России на период до 2020 г. / Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С. [и др.] – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009.

118. 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.

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

120. Отопление тепловым насосом и его эффективность URL: http:// www.domteplo.ru/teplovye_nasosy_dlya_otopleniya.htm (дата обращения: 07.07.2013).

121. 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.

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

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

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

125. National Instruments USB-6008. URL: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/ nid/201986 (дата обращения: 07.07.2013).

126. Модуль ввода аналоговый ОВЕН МВА8. URL: http://www.owen.ru/catalog/ 95286354 (дата обращения: 07.07.2013).

127. 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.

128. Патент на полезную модель №103624 РФ. Измерительный комплекс для мониторинга работы оборудования возобновляемой энергетики / В.В. Харченко, В.В. Чемеков Д.С. Стребков, 2011, Бюл. № 11.

129. Chemekov V., Strebkov D., Adomavicius V., Kharchenko V. Multipurpose measuring complex for continuous monitoring of RES based power systems // Proceedings of the 6th international conference on electrical and control technologies «ECT-2011» / Kaunas, Lithuania, 2011. P. 311-316.

130. Электронные наборы, блоки и модули Мастер Кит. URL: http:// www.masterkit.ru/ (дата обращения: 12.05.2013).

131. Валов М.И., Казанджан Б.И. Использование солнечной энергии в системах теплоснабжения: монография. М.: МЭИ, 1991. 140 с.

132. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения: пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 80 с.

133. Практические рекомендации по определению удельных показателей энергозатрат и потребностей в топливно-энергетических ресурсах в социально инженерной сфере села (жилой сектор, социально-культурная сфера обслуживания, ЛПХ, крестьянские (фермерские) хозяйства). М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. 96 с.

134. Правила и нормы технической эксплуатации жилищного фонда. URL: http://www.nvkb.ru/city/reformagkh/_files/pravo/412.pdf (дата обращения: 13.05.2013).

135. A renewable energy resource web site. URL: http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/ (дата обращения: 05.13.2013).

136. Гидрометеоцентр России. Ежемесячные климатические данные для городов России. Краснодар. URL: http://meteoinfo.ru/climate/klimatgorod/1699-1246618396 (дата обращения: 30.08.2013).

137. Самсонов В.С., Вяткин М.А. Экономика предприятий энергетического комплекса: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2003. 416 с.

138. Экономика энергетики: учеб. пособие для вузов / Рогалев Н.Д., Зубкова А.Г., Мастерова И.В. [и др.] / Под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательство МЭИ, 2005. 288 с.

139. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция. Официальное издание. М.: Экономика, 2000. 421 с.

140. Уровень Инфляции в Российской Федерации. URL: http:/уровень-инфляции.рф (дата обращения: 11.02.2014).

141. Вести. Издательско-полиграфический комплекс. URL: http://www.ipkvesti-spb.ru/bez-rubriki/v-mer-reshili-dat-prognoz-inflyacii-rossii-do-2020-goda.html (дата обращения: 11.08.2013).

142. Нагорная Н.В. Экономика энергетики: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 157 с.

143. Справочник. Энерговопрос. Свет, газ, тепло. URL: http://energovopros.ru/spravochnik/ (дата обращения: 13.05.13).

144. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. [и др.] / Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 144 с.

Приложение А

Показания напряжения холостого хода и тока короткого замыкания фотоэлектрической панели ФЭТМ

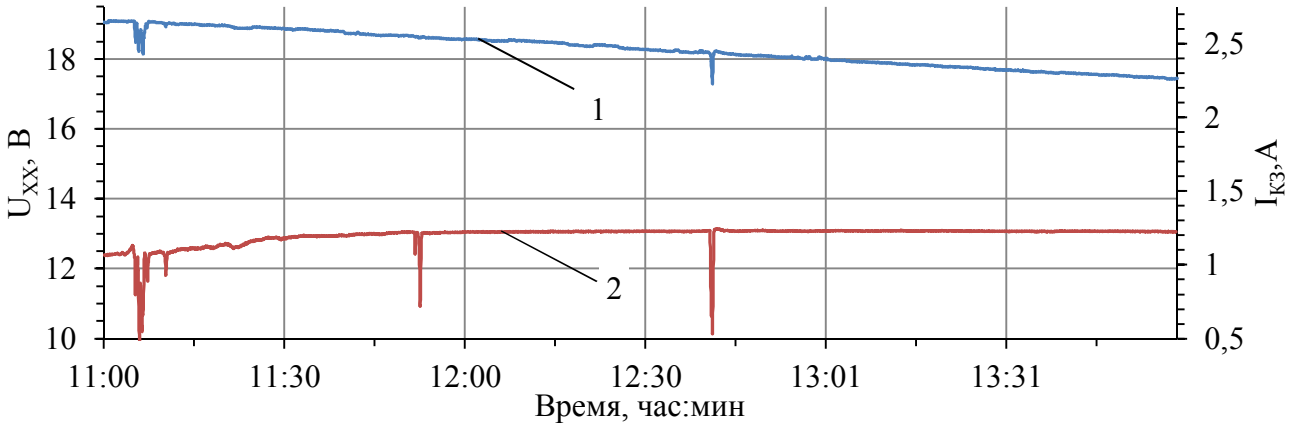


Рисунок А.1 – Показания U_{xx} (1) и $I_{кз}$ (2) фотоэлектрической панели ФЭТМ в период работы

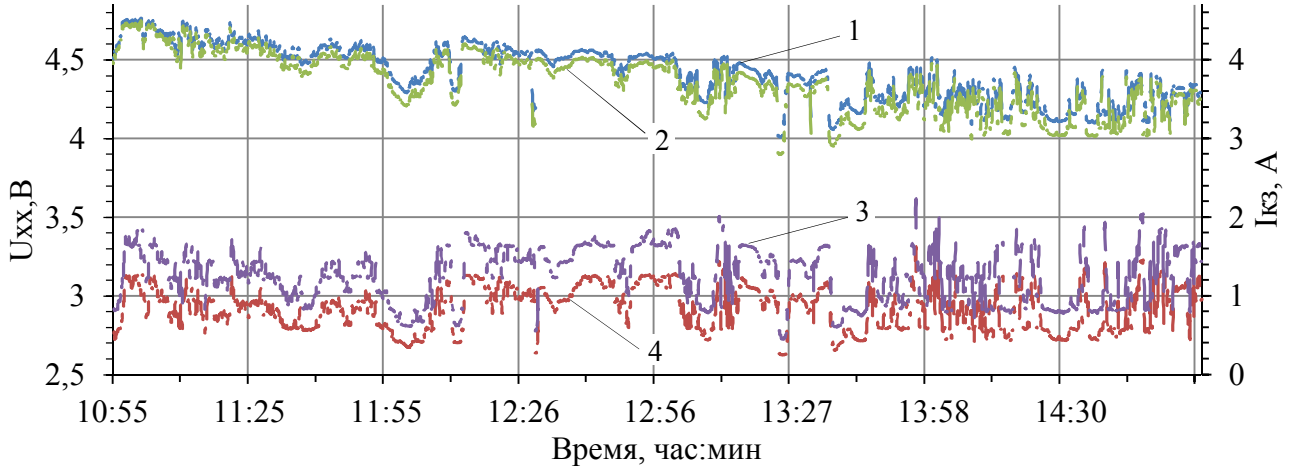


Рисунок А.2 – Показания U_{xx} (1) и $I_{кз}$ (2) фотоэлектрической панели ФЭТМ в период работы:

1 – U_{xx} 1 группы; 2 – U_{xx} 3 группы; 3 – $I_{кз}$ 3 группы; 4 – $I_{кз}$ 1 группы

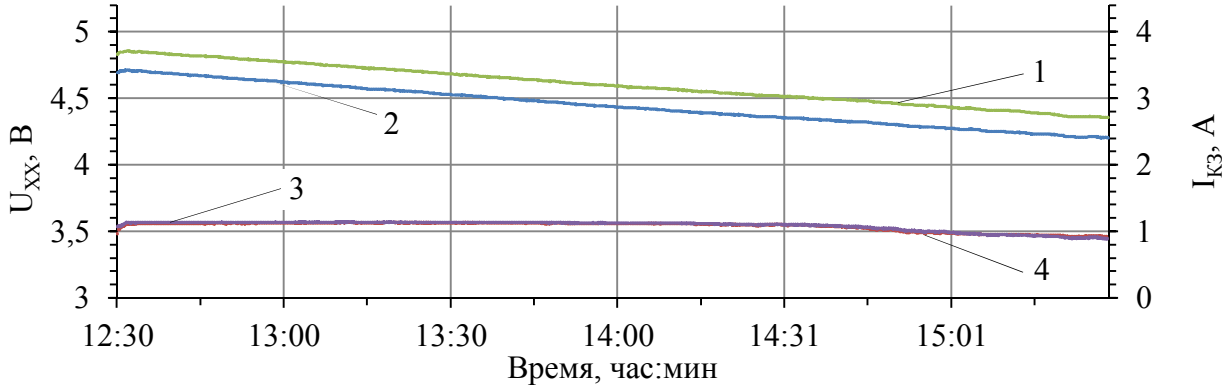


Рисунок А.3 – Показания U_{xx} и $I_{кз}$ фотоэлектрической панели ФЭТМ в период работы:

1 – U_{xx} 4 группы; 2 – U_{xx} 1 группы; 3 – $I_{кз}$ 1 группы; 4 – $I_{кз}$ 4 группы

Приложение Б

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования

Тихонова Павла Валентиновича

Результаты диссертационного исследования Тихонова П.В. использовались СХПК «Победа» Параньгинского района Республики Марий Эл при создании опытного образца солнечной когенерационной установки на основе фотоэлектрического теплового модуля.

Эксплуатация созданной установки позволила сократить затраты на выработку тепловой энергии и повысить надежность электроснабжения наиболее важных потребителей.

Председатель СХПК «Победа» Павлов А.Е.