

На правах рукописи



Фам Ван Той

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЗАВИСИМЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2019

Работа выполнена на кафедре «Систем автоматизированного проектирования вычислительных средств» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»)

Научный руководитель: **Сускин Виктор Васильевич**
доктор технических наук, профессор кафедры САПР ВС ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Юрков Николай Кондратьевич**
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Павлова Светлана Анатольевна
кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информационные технологии в управлении» Академии ФСИН России, г. Рязань

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский Университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита диссертации состоится «01» июля 2019 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», а также на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Д.А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время совершенно ясно – запасы ископаемого топлива не беспредельны, что приводит к необходимости изыскивать новые, предпочтительно возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Особое значение имеет применение технологий прямого преобразования солнечного излучения в электрический ток, реализуемых фотоэлектрическими модулями (ФЭМ). Экспериментальные исследования показывают, что именно этот сектор ВИЭ развивается высокими темпами.

Однако существует проблема, заключающаяся в том, что при повышении температуры окружающей среды до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ собственная температура ФЭМ становится выше температуры $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимально допустимой гарантийной температуры работы модуля и как следствие происходит падение КПД с 20 до 5 % или повышение удельной стоимости модуля, определяемое как отношение затрат на его создание к вырабатываемой мощности.

Для устранения данного недостатка в виде понижения отрицательного влияния повышенной температуры окружающей среды на энергетические характеристики ФЭМ широко применяются термозависимые фотоэлектрические модули с охлаждением, использующие радиатор с проточной жидкостью. Однако это приводит к увеличению затрат на изготовление ФЭМ и к повышению удельной стоимости модуля. Поэтому проблема нахождения оптимальной конструкции термозависимых фотоэлектрических модулей с максимальным КПД или с минимальной удельной стоимостью остается актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Проектирование термозависимых ФЭМ основано на трудах таких авторов, как: Никитин Б. А., Тихонов П. В., Харченко В. В., Джумаев А. Я., Виссарионов В. И. и др.

Виссарионов В. И. и Йе Вин предложили аналитическую модель ФЭМ с охлаждением, которая послужила основой для расчета теплового радиатора.

В работе Харченко В. В., Тихонова П. В. была разработана математическая модель ФЭМ с охлаждением, функционирующего в составе комбинированной системы охлаждения.

Зарубежные ученые Zondag H. A., deVries D. W., van Helden W. G. J., van Zolengen R. J. C., Steenhoven A. A., Chow T. T., Wei He, Jie Ji, Jianping Lu, Gang Pai, Lok-shun Chan, Йе Вин также внесли свой вклад в решение проблемы конструирования ФЭМ с системой охлаждения.

Цель и задачи. Целью исследований является разработка математических моделей, алгоритмов и комплекса программ для оптимизации конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии, обеспечивающих минимальные значения удельной стоимости.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Провести анализ известных конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей, функционирующих при повышенной температуре окружающей среды.

2 Провести анализ математических моделей влияния температуры окружающей среды на характеристики фотоэлектрических модулей.

3 Разработать математические модели термозависимых фотоэлектрических модулей с различными конструкциями системы охлаждения.

4 Разработать алгоритмы нахождения оптимальных значений параметров конструкций системы охлаждения термозависимых фотоэлектрических модулей.

5 Провести моделирование функционирования конструкции термозависимых фотоэлектрических модулей с охлаждением и без охлаждения.

6 Провести сравнительный анализ конструкций ФЭМ по критерию удельной стоимости термозависимых фотоэлектрических модулей с охлаждением.

Научная новизна работы. В диссертации содержится решение актуальной научной задачи разработки моделей, алгоритмов и комплекса программ для нахождения оптимальной конструкции термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии, имеющих существенное значение для сокращения сроков, уменьшения материальных затрат и повышения качества проектирования конструкции.

Научная новизна заключается в следующем:

1 Предложены новые конструкции системы охлаждения термозависимых фотоэлектрических модулей.

2 Предложены оригинальные математические модели термозависимых фотоэлектрических модулей с различными конструкциями системы охлаждения.

3 Разработаны алгоритмы нахождения оптимальных значений параметров конструкций системы охлаждения термозависимых фотоэлектрических модулей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии моделей и алгоритмов исследования и оптимизации конструкции термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии.

Практическая значимость диссертационной работы:

1 Разработаны новые конструкции системы охлаждения термозависимых фотоэлектрических модулей, позволяющие уменьшить влияние температуры окружающей среды на энергетические характеристики модулей.

2 Построены и применены математические модели, позволяющие определить зависимость температуры поверхности термозависимых фотоэлектри-

ческих модулей от параметров конструкций и температуры окружающей среды.

3 Разработан комплекс программ нахождения оптимальных значений параметров конструкций системы охлаждения термозависимых фотоэлектрических модулей.

Методы исследования. Применительно к диссертационной работе теоретические положения, выводы и экспериментальные результаты работы получены с использованием: метода градиентного спуска, метода расчета теплового режима твердых тел, закона теплопередачи Ньютона, закона теплопроводности, математического моделирования с применением программного обеспечения MATHCAD, MATLAB для проведения вычислительного эксперимента. Моделирование функционирования термозависимых фотоэлектрических модулей с помощью семейства программных приложений Flow Simulation в программе Solid Works 2017.

Положения, выносимые на защиту

1 Математические модели зависимости температуры поверхности термозависимых фотоэлектрических модулей от параметров конструкций и температуры окружающей среды.

2 Алгоритмы оптимизации параметров конструкции термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии.

3 Комплекс программ нахождения оптимальных параметров конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей.

4 Моделирование предлагаемых моделей, алгоритмов и комплекса программ нахождения оптимальных параметров конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам: п. 2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»; п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Степень достоверности результатов определяется:

- корректностью полученных математических результатов;
- сравнением результатов, полученных численными методами, с результатами, полученными на основе теории аналитических функций и физического эксперимента;

– сравнением результатов, полученных аналитическими методами, с результатами теплового моделирования с применением современных компьютерных технологий.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на трех всероссийских конференциях: 21-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2016); 23-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2018); 31-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы» (Рязань, 2018).

Публикации. По итогам исследований опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК. Опубликованы 3 тезиса докладов всероссийских конференций и семинаров; опубликованы 3 статьи в межвузовских сборниках научных трудов Рязанского государственного радиотехнического университета. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС, РОСПАТЕНТ).

Результаты диссертационной работы внедрены в:

- 1) ОАО «The Research and Industrial Manufacturing» (Вьетнам) для нахождения оптимальных параметров конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей возобновляемых источников энергии;
- 2) ООО «СОЛЭКС-Р» для проектирования конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей с минимальным значением удельной стоимости;
- 3) учебный процесс РГРТУ на кафедре САПР ВС.

Структура работы. Диссертация содержит 133 страниц основного текста и состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 113 наименований, перечня сокращений и 4 приложений. В диссертацию включено 58 рисунков и 21 таблица.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** выполнен анализ состояния данной научно-технической области. Рассмотрены результаты, достигнутые другими авторами, намечены

направления исследований, сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во **второй главе** предлагаются новые математические модели термозависимых фотоэлектрических модулей, позволяющие определить зависимость температуры поверхности фотоэлектрических модулей от параметров конструкций и температуры окружающей среды.

Первой рассматривается и анализируется конструкция термозависимого фотоэлектрического модуля с охлаждением радиатором типа «лист-труба». В конструкции протекают 3 процесса: поглощение теплоты фотоэлектрического модуля от солнечного излучения, теплопроводность между фотоэлектрическим модулем и поглотителем, а также радиатором, конвективный теплообмен.

С применением методов теплопередачи, теплопроводности в твердых телах и аналитического метода получаем температуру поверхности термозависимого ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба»:

$$T_{\text{сред}} = \frac{T_{\text{вых}} - T_0 - \frac{K}{\lambda}}{m \cdot L} \cdot th(m \cdot L) + T_0 + \frac{K}{\lambda}, \quad (1)$$

где $m = \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_4 \cdot s \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2}}}$; $\beta_1 = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$; $\beta_2 = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}$; L – длина; $T_{\text{вых}}$ – температура

жидкости на выходе трубы; K – поглощающая энергия ФЭМ; λ – коэффициент потерь поверхности ФЭМ; T_0 – температура окружающей среды; δ_1 – толщина ФЭМ; λ_1 – коэффициент теплопроводности ФЭМ; δ_2 – толщина поглотителя; λ_2 – коэффициент теплопроводности поглотителя; λ_3 – коэффициент теплопроводности радиатора; λ_4 – коэффициент теплопроводности жидкости; R_1 – внутренний радиус трубы радиатора; R_2 – внешний радиус трубы радиатора; s – площадь сечения трубы.

Однако в конструкции термозависимого ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба» контактная площадь между ФЭМ и трубой не оптимальная. Поэтому теплота передается из ФЭМ в жидкость медленно, т.к. жидкость проходит большое расстояние по трубе. Кроме этого, в конструкции применяется поглотитель, что приводит к увеличению её стоимости. В работе предлагают новые конструкции термозависимых ФЭМ с охлаждением, которые рассматриваются в следующих разделах.

Рассматривается **вторая** конструкция термозависимого ФЭМ с охлаждением канальным радиатором, разработанная автором.

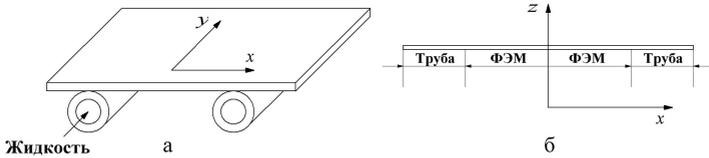


Рисунок 1 – Распределение температуры на поверхности термозависимого ФЭМ с охлаждением каналным радиатором:

а – распределение температуры в направлении оси y ; б – распределение температуры в направлении оси x

На рисунке 1 изображена часть тепловой энергии под воздействием солнечного излучения, поглощаемая фотоэлектрическим модулем, которая передается по поверхности модуля в направлении к стенке трубы путем теплопроводности. Таким образом, температура радиатора между трубами будет выше, чем около труб. Значение температуры поверхности термозависимых ФЭМ на участках, расположенных над трубами, будет постоянным благодаря выравнивающему влиянию трубы.

Под действием тепла жидкость нагревается и в ней возникает температурный градиент в направлении течения. Поскольку на любом участке радиатора общий уровень температуры определяется уровнем местной температуры жидкости, пространственная картина поля температуры будет выглядеть, как показано на рисунке 1, а. На рисунке 1, б представлено распределение температуры в направлении оси x при любом значении y и в направлении оси y при любом значении x , соответственно. Распределение температуры между двумя трубами радиатора можно получить, предполагая, что температурный градиент в направлении потока является пренебрежимо малым. Рассмотрим систему охлаждения в виде «лист-труба», изображенную на рисунке 2.

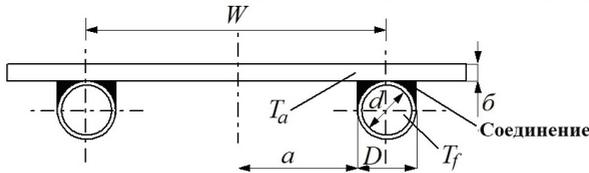


Рисунок 2 – Конструкция в виде «лист-труба»

Расстояние между трубами радиатора – W , внешний диаметр трубы радиатора – D . Задача определения температурных полей в области между средней линией, разделяющей трубы, и основанием трубы может рассматриваться как классическая задача о теплопроводности ребра. На рисунке 2 изображено ребро длиной $a = (W - D) / 2$. Выделим элемент ребра единичной длины в направлении потока жидкости, ширина которого равна Δx . Уравнение системы баланса в энергии для этого элемента определяется формулой

$$K \cdot \Delta x - \lambda \cdot \Delta x \cdot (T_x - T_0) + (-\lambda_1 \cdot \delta \cdot L \cdot \frac{dT_x}{dx}) \Big|_x - (-\lambda_1 \cdot \delta \cdot L \cdot \frac{dT_x}{dx}) \Big|_{x+\Delta x} = 0, \quad (2)$$

здесь δ – толщина ФЭМ; L – длина единицы трубы.

Разделив на Δx обе части уравнения (2) и перейдя к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$, получим решение уравнения:

$$T_x = (T_y - T_0 - \frac{K}{\lambda}) \cdot \frac{ch(m \cdot x)}{ch(m \cdot a)} + T_0 + \frac{K}{\lambda}, \quad (3)$$

где T_y – температура поверхности ФЭМ по оси y ; $m = \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_1 \cdot \delta \cdot L}}$; a – расстояние между двумя трубами.

Поглощенная радиатором полезная энергия также включает энергию, поглощаемую непосредственно над трубой вдоль оси y и равную

$$Q = \Delta y \cdot K - \lambda \cdot \Delta y \cdot (T_y - T_0). \quad (4)$$

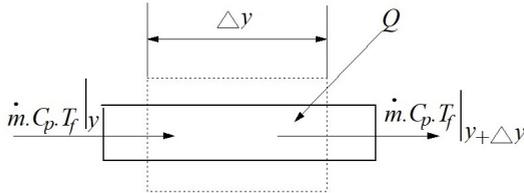


Рисунок 3 – Баланс энергии для элемента жидкости

Сопروتвление переносу тепла к жидкости складывается из сопротивления соединения листа с трубой радиатора и сопротивления переносу тепла от стенки трубы радиатора к жидкости. С другой стороны, в системе происходит процесс теплопроводности – это процесс, посредством которого тепло распространяется в твердых телах, находящихся в состоянии покоя. Таким образом, теплоту, которая передается трубе на Δx , можно определить формулой

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot (T_y - T_f)}{\frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{D}{d}}, \quad (5)$$

где d – внутренний диаметр трубы; T_f – температура жидкости по оси y ; λ_2 – коэффициент теплопроводности радиатора.

Энергия на единицу длины трубы, определяемая уравнением (5), в конечном счете передается жидкости. Жидкость поступает в радиатор при температуре $T_{\text{вх}}$ и выходит из него при более высокой температуре $T_{\text{вых}}$.

Из моделирования динамики движения жидкости (рисунок 3) баланс энергии для элемента жидкости на участке одной трубы длиной Δy можно определить в виде

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot T_f \Big|_y - \dot{m} \cdot C_p \cdot T_f \Big|_{y+\Delta y} + Q = 0, \quad (6)$$

где \dot{m} – массовый расход теплоносителя; C_p – теплоемкость теплоносителя.

Решение уравнения (4), (5) и (6) имеет вид

$$T_y = \left(T_{a,0} - \frac{K}{\lambda} - T_0\right) \cdot e^{\frac{\beta \cdot \lambda}{(\beta + \lambda) \cdot \dot{m} \cdot C_p} \cdot y} + \frac{K}{\lambda} + T_0, \quad (7)$$

здесь $\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{D}{d}}$; $T_{a,0}$ – начальная температура поверхности ФЭМ.

Подставив (7) в (3) получим:

$$T_{(x,y)} = \left(T_{a,0} - \frac{K}{\lambda} - T_0\right) \cdot e^{\frac{\beta \cdot \lambda}{(\beta + \lambda) \cdot \dot{m} \cdot C_p} \cdot y} \cdot \frac{ch(m \cdot x)}{ch(m \cdot a)} + T_0 + \frac{K}{\lambda}. \quad (8)$$

Для нахождения температуры поверхности термозависимого ФЭМ используется средняя температура, которая представлена формулой

$$T_{ср\partial} = \frac{1}{V} \cdot \int_V T dV, \quad (9)$$

где V – объем всего тела или его части.

Таким образом, температура поверхности термозависимого ФЭМ с охлаждением канальным радиатором вычисляется формулой:

$$T_{ср\partial} = A \cdot \left[e^{\frac{\beta \cdot \lambda}{(\beta + \lambda) \cdot \dot{m} \cdot C_p} \cdot L} - 1 \right] \cdot \frac{th(m \cdot a)}{m} + T_0 + \frac{K}{\lambda}, \quad (10)$$

где $A = \left(T_{a,0} - \frac{K}{\lambda} - T_0\right) \cdot \frac{(\beta + \lambda) \cdot \dot{m} \cdot C_p}{\beta \cdot \lambda}$.

Далее предложены **третья** конструкция и её математическая модель термозависимого ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором, разработанная автором. В конструкции термозависимого ФЭМ с охлаждением под воздейст-

вием солнечного излучения происходят два процесса. В первом процессе фотоэлемент вырабатывает электрическую энергию. А второй связан с нагревом поверхности термозависимого ФЭМ с охлаждением.

Уравнение баланса, описывающее второй процесс, представлено в виде

$$Q = \Delta\tau \cdot K - \lambda \cdot \Delta\tau \cdot (T_a - T_0). \quad (11)$$

После второго процесса происходит нагрев жидкости в щелевом радиаторе за счет теплопередачи, возникающей между фотоэлектрическим модулем и жидкостью в радиаторе. Уравнение теплоты, которая передается радиатору, имеет вид

$$Q = \frac{T_a - T_f}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \cdot S \cdot \Delta\tau, \quad (12)$$

где τ – величина, характеризующая изменение температуры в корпусе ФЭМ; T_f – температура жидкости в радиаторе; δ_1 , λ_1 – толщина и коэффициент теплопроводности ФЭМ; δ_2 , λ_2 – толщина и коэффициент теплопроводности щелевого радиатора; S – контактная площадь между ФЭМ и щелевым радиатором.

При нагреве жидкости в радиаторе процесс переноса тепла происходит в движущейся текучей жидкости и обусловлен совместным действием двух механизмов переноса тепла – собственно конвективного переноса и теплопроводности. Таким образом, распространение тепла в радиаторе осуществляется за счет переноса тепла при перемещении текучей жидкости из области с более высокой температурой в область с меньшей температурой, а также за счет теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией между ними. Таким образом, уравнение теплоты (рисунок 4), которая передается внутри жидкости, определяется формулой

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot T_f \Big|_{\tau} - \dot{m} \cdot C_p \cdot T_f \Big|_{\tau + \Delta\tau} + Q = 0. \quad (13)$$

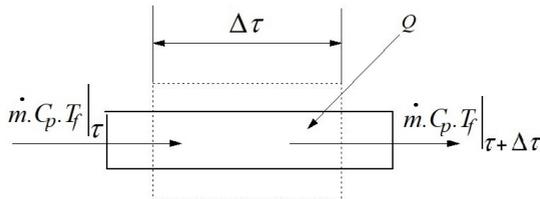


Рисунок 4 – Баланс энергии для элемента жидкости

Большинство термозависимых фотоэлектрических модулей с охлаждением работают в нестационарном режиме, поскольку режим не может быть стационарным при нестационарном характере внешних воздействий. Кроме это-

го, движение жидкости в данной конструкции радиатора является турбулентным из-за её большой скорости. Таким образом, исследуется влияние теплоемкости и потока жидкости на режим ее работы. С другой стороны, температура на всех точках поверхности термозависимых ФЭМ с охлаждением или внутри жидкости одинакова. Таким образом, величиной, характеризующей изменение температуры, является время t .

Решив уравнения (11), (12) и (13), получим температуру поверхности термозависимого ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором:

$$T_a = (T_{a.0} - \frac{K}{\lambda} - T_0) \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot \beta}{v \cdot C_p \cdot (\lambda + \beta)}} + \frac{K}{\lambda} + T_0, \quad (14)$$

где $\beta = \frac{S}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$; $T_{a.0}$ – начальная температура поверхности ФЭМ; v – скорость потока жидкости.

В **третьей главе** разработаны алгоритмы оптимизации параметров конструкций термозависимых ФЭМ с охлаждением, основанные на численных методах и предложенных математических моделях из второй главы.

Для нахождения оптимальных параметров термозависимого ФЭМ с охлаждением выбирается критерий оптимальности, называемый удельной стоимостью, то есть показатель $\bar{K} = \frac{B}{W}$, где B – затраты на изготовление термозависимых ФЭМ; W – мощность в ваттах, вырабатываемая термозависимым ФЭМ.

Вырабатываемую мощность термозависимых ФЭМ с охлаждением можно представить в виде

$$W = W_0 \cdot [1 - \mu \cdot (T_a - T_{нор})], \quad (15)$$

где W_0 – максимальная мощность ФЭМ; μ – постоянная; T_a – температура поверхности ФЭМ; $T_{нор}$ – норм температуры поверхности ФЭМ с охлаждением.

А себестоимость термозависимых ФЭМ с охлаждением определяются формулой

$$B = c \cdot x, \quad (16)$$

где x – параметр, характеризующий термозависимый ФЭМ с охлаждением; c – его затраты.

В главе 2 получена зависимость средней температуры поверхности термозависимых ФЭМ с охлаждением от параметров, характеризующих термозависимые ФЭМ с охлаждением, которую можно представить в виде

$$T_a = f(x), \text{ где } x = (x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Обозначим $\Omega > 0$ – множество параметров термозависимых ФЭМ с охлаждением, $x \in \Omega$.

Тогда критерий оптимальности

$$\bar{K}(x) = \frac{c \cdot x}{W_0 \cdot [1 - \mu \cdot (f(x) - T_{\text{нор}})]}. \quad (17)$$

В главе 1 показано, что для снижения удельной стоимости термозависимых ФЭМ необходимо понижать температуру поверхности термозависимых ФЭМ.

Таким образом, математическое описание задачи оптимизации параметров термозависимых ФЭМ с охлаждением может быть представлено следующим образом:

- цель оптимизации – минимизация значения температуры поверхности термозависимых ФЭМ:

$$(T_a = f(x)/x) \rightarrow \min, \quad x \in \Omega$$

где x – параметры, характеризующие термозависимые ФЭМ с охлаждением;

- ограничения:

- 1) температура поверхности ФЭМ не должна быть меньше норма температуры поверхности ФЭМ

$$f(x) > T_{\text{нор}}, \quad x \in \Omega.$$

- 2) выражение мощности ФЭМ не должно быть равно 0, тогда коэффициент соответствует

$$\mu \cdot (f(x) - T_{\text{нор}}) \neq 1 \Rightarrow \mu \neq \frac{1}{f(x) - T_{\text{нор}}}, \quad x \in \Omega.$$

Задача оптимизации сводится к нахождению множества оптимальных параметров $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$, где $x^* \in \Omega$ при условии нахождения минимального значения или минимального значения эффективности \bar{K} .

В настоящее время для решения задачи оптимизации применяются различные алгоритмы. Один из них – алгоритм градиентного спуска, использующий численный метод и адаптированный для сформулированной в настоящей работе оптимизационной задачи поиска минимального значения удельной стоимости термозависимых ФЭМ с охлаждением, а также поиска оптимальных параметров конструкций термозависимых ФЭМ с охлаждением.

Алгоритм, основанный на идеях метода градиентного спуска, описан следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Пусть $k = 1$, задать начальную точку x^k , $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$. Найти градиент функции в произвольной точке x^k

$$\nabla T_{\text{сред}}(x^k) = \left\| \frac{\partial T_{\text{сред}}(x_i^k)}{\partial x_i^k} \right\|^T.$$

Шаг 2. Вычислить градиент функции

$$|\nabla T_{\text{сред}}(x^k)| = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial T_{\text{сред}}(x_i^k)}{\partial x_i^k} \right)^2}.$$

Шаг 3. Выбрать значение t^k .

Шаг 4. Вычислить $x^{k+1} = x^k + t^k \cdot \nabla T_{\text{сред}}(x^k)$.

Шаг 5. Проверить выполнение условия

$$|x_i^{k+1} - x_i^k| < \varepsilon_{1i},$$

$$|T_{\text{сред}}(x_i^{k+1}) - T_{\text{сред}}(x_i^k)| < \varepsilon_2,$$

$$\frac{B^k}{W^k} \leq \frac{B^{k+1}}{W^{k+1}}.$$

Если одно из условий не выполнено, то $k=k+1$. Перейти к шагу 2;

Шаг 6. Если эти условия выполнены, то расчет закончен и $x^* = x^k$.

В **четвертой** главе разработан комплекс программ нахождения оптимальных параметров конструкций термозависимых ФЭМ с охлаждением и получены результаты оптимизации конструкции термозависимых ФЭМ с охлаждением.

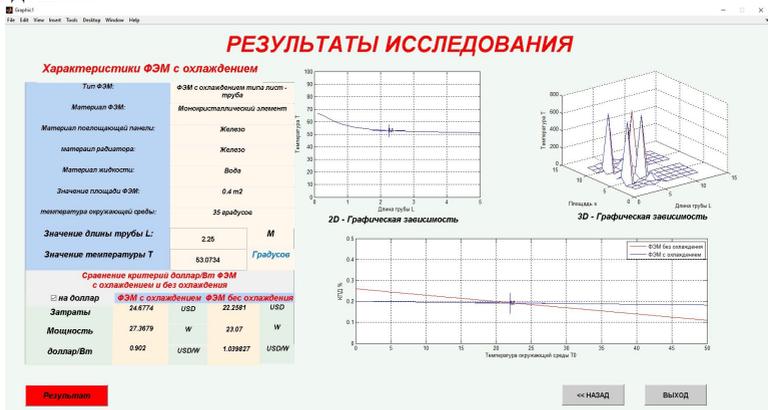


Рисунок 5 – Образец экранной формы

Разработана и зарегистрирована программа в РОСПАТЕНТ «Программа оптимизации параметров фотоэлектрического модуля с охлаждением» (рисунок 5).

При использовании разработанного комплекса программ получены значения параметров конструкции термовзависимых ФЭМ с охлаждением.

Для сравнения полученных значений параметров конструкции воспользуемся известными пакетами прикладных программ, такими как Solid Works, для проектирования конструкции термовзависимых ФЭМ с охлаждением при исследовании теплового режима.

Сравнительные результаты исследования показаны на рисунке 6.

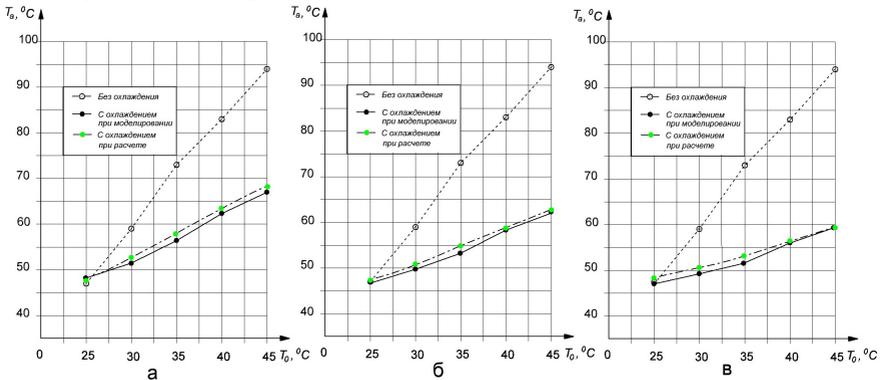


Рисунок 6 – Результаты при моделировании:

а – термовзависимые ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба»;

б – термовзависимый ФЭМ с охлаждением канальным радиатором;

в – термовзависимый ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором

Из рисунка 6 получаем относительную погрешность:

– для термовзависимого ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба»:

$$\delta = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{|T_{i_{\text{расчет}}} - T_{i_{\text{моделирование}}}|}{T_{i_{\text{моделирование}}}} \cdot 100\% = 2,23\% ;$$

– для термовзависимого ФЭМ с охлаждением канальным радиатором:

$$\delta = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{|T_{i_{\text{расчет}}} - T_{i_{\text{моделирование}}}|}{T_{i_{\text{моделирование}}}} \cdot 100\% = 1,55\% ;$$

– для термовзависимого ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором:

$$\delta = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{|T_{i_{\text{расчет}}} - T_{i_{\text{моделирование}}}|}{T_{i_{\text{моделирование}}}} \cdot 100\% = 2,87\% .$$

Как видно из расчета, температура поверхности фотоэлектрического модуля, полученная на основании моделирования и расчета по формулам (1), (10) и (14), совпадает с погрешностью не более 3 %.

Таблица – Результаты сравнения удельной стоимости термозависимых ФЭМ с охлаждением (мощностью 1 кВт)

Экономический показатель	ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба»	ФЭМ с охлаждением канальным радиатором	ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором
Максимальная температура поверхности ФЭМ, °C	66,8	62,4	59,9
Вырабатываемая мощность в год, кВтч	1080	1141	1183
Затраты, руб.	55682	56965	57571
Удельная стоимость, \$/W	0,805	0,78	0,76

В **заключении** подведены основные результаты диссертационной работы, даются рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе исследований получены следующие новые научные результаты.

1 Рассмотрены основные типы известных конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей, а также проанализированы существующие их модели, недостатком которых является отсутствие параметров конструкций, влияющих на энергетические характеристики модулей.

2 Проведено исследование конструкций термозависимого фотоэлектрического модуля с охлаждением с различными типами радиаторов. Предложены конструкции системы охлаждения, позволяющие уменьшить влияние температуры окружающей среды на энергетические характеристики модулей.

3 Разработаны математические модели зависимости температуры поверхности термозависимых ФЭМ с охлаждением от параметров конструкций ФЭМ и температуры окружающей среды.

4 Сформулирована и решена задача оптимизации, которая сведена к нахождению экстремума целевой функции в виде минимизации температуры корпуса ФЭМ при заданных ограничениях параметров конструкций.

5 Разработаны эффективные алгоритмы оптимизации параметров предложенных конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей с охлаждением с целью достижения минимальной удельной стоимости его функционирования в условиях повышенной температуры окружающей среды.

6 Разработанные модели и алгоритмы реализованы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного

эксперимента по моделированию функционирования термозависимых фотоэлектрических модулей и нахождению оптимальных параметров конструкций модулей возобновляемых источников энергии.

7 С применением современных компьютерных технологий проведено моделирование различных конструкций термозависимого фотоэлектрического модуля с охлаждением с помощью семейства программных модулей Flow Simulation в программе Solid Works 2017. Проведен сравнительный анализ результатов решения задач оптимизации конструкций термозависимых ФЭМ с применением разработанных моделей и алгоритмов.

8 Проведено сравнение удельной стоимости различных вариантов использования ФЭМ с охлаждением, показавшее перспективность их применения. Показано, что удельная стоимость ФЭМ, получаемая с применением системы охлаждения, равна: для ФЭМ с охлаждением радиатором типа «лист-труба» – 0,805; для ФЭМ с охлаждением канальным радиатором – 0,78; для ФЭМ с охлаждением щелевым радиатором – 0,76.

9 Подтверждена корректность теоретических выводов путем их сравнения с результатами экспериментального моделирования и решения задач оптимизации конструкции. Результаты показали, что температура поверхности термозависимых ФЭМ, полученная на основании моделирования современными пакетами программ, совпадает с рассчитанной температурой с погрешностью не более 3 %.

10 На основании анализа результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в диссертационной работе разработаны модели, алгоритмы и комплекс программ оптимизации конструкций термозависимых фотоэлектрических модулей, функционирующих при повышенной температуре окружающей среды.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Фам В. Т. Математическая модель конструкции фотоэлектрической панели с охлаждением [Текст] / В. В. Сускин, В. Т. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 61. – С. 119 – 123.

2. Фам В. Т. Математическая модель температурного режима фотоэлектрической панели с охлаждением тепловым канальным радиатором [Текст] / В. В. Сускин, В. Т. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 62. – С. 143 – 148.

3. Фам В. Т. Исследование теплового режима фотоэлектрического модуля с охлаждением щелевым радиатором [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин //

Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. № 66. – С. 124-129.

4. Фам В. Т. Алгоритм оптимизации параметров конструкции фотоэлектрического модуля с охлаждением [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. № 67. – С. 59-65.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619638, Российская Федерация. Программа оптимизации параметров фотоэлектрического модуля с охлаждением [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин. Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 09.08.2018, заявка № 2018616720.

Статьи в сборниках научных трудов

6. Фам В. Т. Модуль управления солнечной батареей для слежения за солнцем [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2015. – С. 117-120.

7. Фам В. Т. Особенности функционирования фотоэлектрической тепловой панели [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 176-180.

8. Фам В. Т. Использование метода градиентного спуска для определения параметров фотоэлектрического модуля с охлаждением [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 112-116.

Тезисы докладов конференций

9. Фам В. Т. Перспектива развития фотовольтаических солнечных установок [Текст] / В. Т. Фам // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI юбилейной Всероссийской научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2016. – С.331-333.

10. Фам В. Т. Моделирование теплового режима фотоэлектрического модуля с охлаждением радиатором типа «лист-труба» [Текст] / В. Т. Фам // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIII Юбилейной Всероссийской научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2018. – С.260-262.

11. Фам В. Т. Моделирование теплового режима фотоэлектрического модуля с охлаждением канальным радиатором [Текст] / В. Т. Фам, В. В. Сускин // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы: материалы XXXI Всероссийской научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2018. – С.170-173.

Фам Ван Той

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЗАВИСИМЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2019. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет имени
В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ