

ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАБОЛОИДНОГО ТИПА

Панченко^{1,2} В.А.¹Российский университет транспорта (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, tu@miit.ru²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, vim@vim.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и исследования солнечного теплофотоэлектрического модуля с концентраторами солнечного излучения параболического типа. В состав солнечного модуля входит составной концентратор, который обеспечивает равномерную освещённость концентрированным солнечным излучением по поверхности цилиндрического теплофотоэлектрического фотоприёмника в виде алюминиевого радиатора с фотоэлектрическими преобразователями. Разработанная методика расчёта рабочего профиля концентратора позволяет обеспечивать необходимое распределение освещённости в его фокальной области. На поверхности радиатора с помощью микродугового оксидирования образован тонкий теплопроводный слой диэлектрика, на котором закреплены планарные и матричные фотоэлектрические преобразователи. При засветке концентрированным солнечным излучением электрическая эффективность специально разработанных матричных фотоэлектрических преобразователей увеличивается, а отбираемая теплоносителем теплота увеличивает общую эффективность солнечного модуля. Для визуализации теплового состояния радиатора водяного охлаждения фотоэлектрических преобразователей разработана методика расчёта, которая реализуется в программном комплексе конечно-элементного анализа Ansys и позволяет визуализировать тепловые поля и течения теплоносителя в радиаторе. В результате проведённых исследований концентраторного теплофотоэлектрического модуля получено увеличение эффективности матричных фотоэлектрических преобразователей с одновременным получением тёплой воды на выходе. Равномерное освещение фотоэлектрических преобразователей концентрированным солнечным излучением обеспечивает оптимальный режим их работы. Получаемую электрическую и тепловую энергию потребитель может использовать в автономном или параллельном с существующей энергосетью энергоснабжении.

Предмет исследования: концентратор солнечного излучения параболического типа, обеспечивающий равномерную освещённость концентрированным излучением поверхность теплофотоэлектрического фотоприёмника с кремниевыми планарными и матричными фотоэлектрическими преобразователями, отводимое от которых тепло используется потребителем, увеличивая, таким образом, общую эффективность модуля.

Материалы и методы: для создания конструкторской документации солнечного модуля применялась система автоматизированного проектирования КОМПАС 3D; для моделирования и визуализации теплового состояния радиатора водяного охлаждения с фотоэлектрическими преобразователями применялась система конечно-элементного анализа ANSYS; для электрической изоляции поверхности алюминиевого радиатора применялась технология микродугового оксидирования; для изготовления фотоприёмника солнечного модуля применялась технология капсулирования двухкомпонентным полисилоксановым компаундом; для натурных испытаний солнечного теплофотоэлектрического модуля использовалась измерительная система, позволяющая записывать электрические и температурные показатели модуля.

Результаты: в результате проведённых расчетов и исследований разработан, изготовлен и испытан солнечный теплофотоэлектрический модуль с концентраторами солнечного излучения параболического типа с матричными фотоэлектрическими преобразователями, на поверхности которых образуется равномерная освещённость, их электрическая эффективность увеличивается, а с помощью отводимой теплоты появляется возможность увеличить общую эффективность солнечного модуля.

Выводы: разработаны методики, которые позволяют рассчитывать рабочий профиль концентратора солнечного излучения параболического типа, обеспечивающий равномерную освещённость в фокальной области, и визуализировать с помощью системы конечно-элементного анализа тепловое состояние и течения теплоносителя радиатора, находящегося в фокусе концентратора. Электрическая эффективность матричных фотоэлектрических преобразователей увеличивается в потоке концентрированного солнечного потока благодаря равномерности освещённости. Теплоноситель, отбирая тепло от фотоэлектрических преобразователей, охлаждает их, увеличивая таким образом их электрическую эффективность, а полученное тепло может использоваться потребителем. Таким образом, увеличивается не только электрическая эффективность модуля, но и тепловая, что увеличивает общую эффективность модуля. Получаемую электрическую и тепловую энергию от солнечного теплофотоэлектрического модуля потребитель может использовать в автономной или параллельной с существующей сетью энергосистеме.

Ключевые слова: солнечная энергия, концентратор солнечного излучения, теплофотоэлектрический модуль, система конечно-элементного анализа, матричные фотоэлектрические преобразователи, вольтамперная характеристика, эффективность, энергоснабжение.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия энергостанции на основе преобразования возобновляемых источников энергии значительно расширили свою географию, а технологии по увеличению их эффективности развиваются опережающими темпами [1 – 4]. В большей степени получили развитие электростанции на основе преобразователей ветровой энергии и солнечной энергии, причём солнечные энергостанции последние годы имеют более активное развитие по сравнению с другими станциями на основе возобновляемой энергии [5 – 10]. Преобразование солнечной энергии в тепло и электричество представляет интерес не только для автономных и удаленных потребителей, но и для владельцев солнечных электростанций, которые могут быть использованы для решения региональных энергетических задач и глобальных проблем энергетики.

Одним из методов преобразования солнечной энергии в электрическую является метод прямого преобразования с помощью планарных и матричных фотоэлектрических преобразователей [11 – 15]. Существующие в настоящее время фотоэлектрические преобразователи можно классифицировать по количеству р-п переходов – однопереходные и многопереходные, а также по расположению р-п перехода – планарные и с вертикальными р-п переходами. К многопереходным фотоэлектрическим преобразователям можно отнести планарные – каскадные и фотоэлектрические преобразователи с вертикальным р-п переходом (матричные фотоэлектрические преобразователи). В солнечной энергетике, при использовании планарных и матричных фотоэлектрических преобразователей, выделяются два направления – фотоэлектрическое преобразование неконцентрированного и концентрированного солнечного излучения. Также существует два направления снижения стоимости солнечных фотоэлектрических станций: улучшение технико-экономических характеристик планарных фотоэлектрических преобразователей и создание станций с концентраторами солнечного излучения. Применение концентрирующих систем позволяет уменьшить количество фотоэлектрических преобразователей.

Основными особенностями матричных кремниевых фотоэлектрических преобразователей, разработанных во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства, является возможность их использования при высоких концентрациях солнечного излучения, при котором наблюдается увеличение их электрической эффективности [16 – 18]. При использовании таких фотоэлектрических преобразователей возможно создание комбинированной установки для производства электричества и тепла. В таких теплофотоэлектрических системах первоочередной

задачей является отвод тепла от фотоэлектрических преобразователей, где конструкция солнечных модулей может быть как планарной [19 – 24], так и концентраторной. Также в солнечных теплофотоэлектрических установках большую роль играет тип концентратора солнечного излучения и форма его рабочего профиля, а также методика его проектирования и точность изготовления [25 – 28].

Таким образом, большой потенциал для внедрения имеют солнечные концентраторные теплофотоэлектрические установки, концентраторы которых обеспечивают равномерную освещённость поверхности фотоэлектрических преобразователей, в качестве которых используются кремниевые матричные солнечные элементы, при охлаждении которых общая эффективность солнечного модуля значительно увеличивается.

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Для создания подобных установок, основой которых являются концентраторы солнечного излучения, необходима разработка методики расчёта рабочего профиля концентратора, который обеспечивал бы равномерную освещённость в фокальной области и выбор метода изготовления такого концентратора солнечного излучения.

Центробежный метод [29] позволяет получать параболические поверхности с помощью свойства жидкости приобретать параболическую поверхность при равномерном вращении. Жидкости с разными удельными весами образуют эквипотенциальные поверхности при равномерном вращении, когда на равномерно вращающуюся жидкость наливается более лёгкий материал, который в процессе вращения твердеет. После отверждения образуется выпуклая форму-оригинал, которая имеет гладкую поверхность высокой чистоты, образованная на разделе двух жидкостей.

Метод гальванопластики [29] позволяет изготавливать легкие металлические концентраторы солнечного излучения высокой точности и практически любых размеров. В процессе изготовления на матрицу, которая имеет необходимую конфигурацию и высокий класс чистоты отражающей поверхности, химическим способом наносится токопроводящий слой серебра, на который затем электрохимически осаждается слой металла (никель, медь), который имеет заданную толщину. К полученной копии крепится каркас жесткости, после чего она отделяется от матрицы.

Метод моллирования стекла [29] заключается в прогибе листового стекла на металлическую матрицу при нагреве до температур размягчения стекла под действием силы веса или вакуума. Матрица состоит из плиты, на которой установлены ленты стойки с поворотными площадками. Перед моллированием площадки устанавливаются по

касательным к необходимой поверхности с помощью специальных шаблонов, после чего ориентированные площадки на стойках фиксируются и матрица готова к проведению процесса моллирования.

Изготовление отражающей поверхности из плоских изогнутых зеркал [29] заключается в прогибе стекла по опорам, расположенным по его периферии, с помощью приложения усилий в центре стекла, когда величина прогиба находится в пределах упругого прогиба.

Параболические концентраторы с небольшой точностью изготовления для приготовления пищи и нагрева воды популярны среди сельских жителей Азии, Африки и других южных стран. Подобные концентраторы изготавливаются зачастую вручную с небольшой точностью, однако пригодные для приготовления пищи и нагрева воды. Основания таких концентраторов зачастую изготавливаются из бамбука, а светоотражающая поверхность из светоотражающих алюминиевых полос. Фома таких концентраторов может быть фасетной, квадратированной в виде параболоида. Окупаемость таких концентраторов зачастую составляет меньше одного года. Не редко к качеству концентратора солнечного излучения может применяться стандартная спутниковая антенна, на поверхность которой нанесено светоотражающее покрытие.

Для изготовления концентраторов солнечного излучения главной задачей, наряду с технологией изготовления является расчёт его рабочего профиля, который при использовании совместно с матричными фотоэлектрическими преобразователями должен обеспечивать на их поверхности равномерную освещённость с целью обеспечения их максимальной электрической эффективности.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАТОРА ПАРАБОЛОИДНОГО ТИПА ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методика расчёта рабочего профиля концентратора солнечного излучения

параболоидного типа базируется на подборе соответствующих параболических профилей концентратора, которые удовлетворили бы конкретным граничным условиям, таким, как распределение освещённости концентрированным солнечным излучением, размер фокальной области, размеры фотоприёмника, необходимая мощность и т.д.. С использованием разработанной методики рассчитан составной концентратор параболоидного типа солнечного теплофотоэлектрического модуля, который обеспечивает равномерную освещённость концентрированным солнечным излучением в области фокального пятна на поверхности цилиндрического фотоприёмника. В рассматриваемом солнечном модуле обеспечивается работа фотоэлектрических преобразователей при средних концентрациях солнечного излучения (5 – 10 крат), получение технически приемлемого напряжения (12 В и выше), увеличение эффективности преобразования солнечного излучения, уменьшение стоимости вырабатываемой энергии, а также догрев теплоносителя до более высоких температур с помощью второго концентратора для тепловой части фотоприёмника.

Теплофотоэлектрический солнечный модуль (рисунок 1 слева) состоит из концентратора солнечного излучения параболоидного типа 1, который обеспечивает концентрацию солнечного излучения в фокальной области на цилиндрической фотоэлектрической части 3 поверхности фотоэлектрического модуля 2 и в фокальной области на поверхности тепловой части 4 фотоприёмника.

Солнечное излучение, попадая на поверхность концентратора 1, отражается под углами наклона, ориентированными в своих зонах ($a - b$, $b - c$, $c - d$) таким образом, что обеспечивается достаточно равномерная концентрация освещённости солнечным излучением:

- на фотоэлектрическом фотоприёмнике 3 радиатора 2, выполненного в виде цилиндра с радиусом r_0 из скоммутированных матричных фотоэлектрических преобразователей с высотой h_0 . Радиатор 2 соединён с устройством охлаждения 5;

- на тепловом фотоприёмнике 4 радиатора 2, выполненного в виде усеченного конуса с максимальным радиусом r_0 и минимальным радиусом r_{B0} боковой поверхности для догрева теплоносителя.

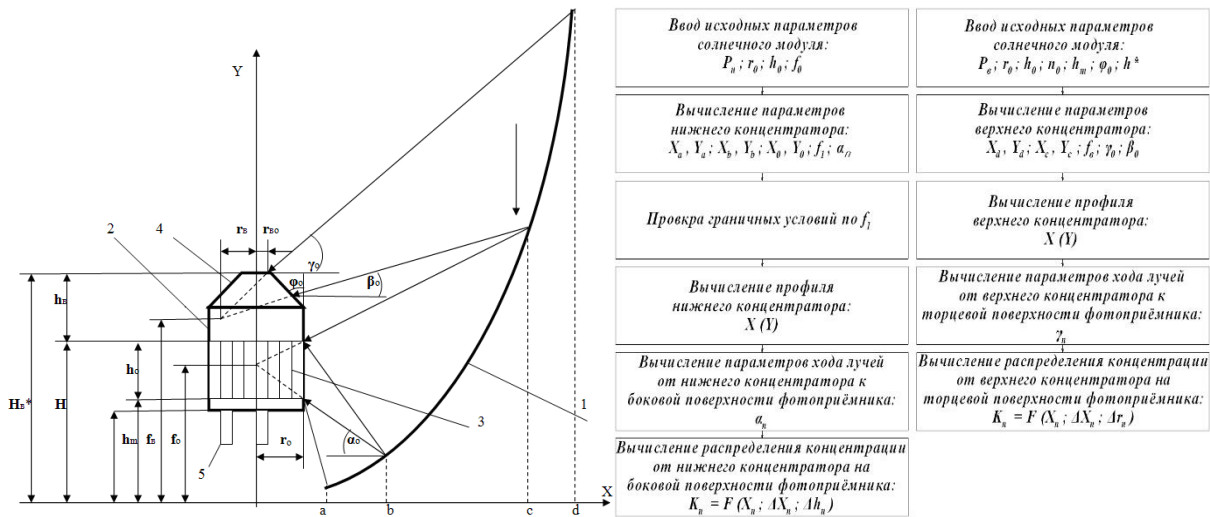


Рис. 1. Схема работы теплофотоэлектрического модуля (слева) и методика расчёта профиля концентратора (справа)
Fig. 1. The scheme of operation of the photovoltaic module (left) and the method for calculating the profile of the concentrator (right)

На примере составного двойного концентратора солнечного излучения, на рисунке 1 справа представлена методика расчёта его профиля, где P_n – мощность падающего солнечного излучения на нижний концентратор; P_e – мощность падающего солнечного излучения на верхний концентратор; h_o – высота фотоэлектрической части фотоприёмника; h^* – высота конусной (тепловой) части фотоприёмника; h_m – конструктивный параметр; r_o – радиус цилиндра фотоприёмника; n_o – количество интервалов при расчете в программе EXCEL; n – текущий интервал при расчете в программе EXCEL; f_o – фокусное расстояние параболы в зоне $b - c$; f_1 –

фокусное расстояние параболы в зоне $a - b$; f_e – фокусное расстояние параболы в зоне $c - d$; β_o – угол между отраженным от поверхности в точке координат X_c, Y_c верхнего концентратора и уровнем f_e ; γ_o – угол в зоне рабочего профиля концентратора $c - d$ между отраженным от поверхности в точке координат X, Y и уровнем f_e .

Профиль отражающей поверхности зон $a - b, b - c$ концентратора $X (Y)$ определяется системой уравнений, соответствующей условию распределения освещенности концентрированным излучением всей поверхности фотоэлектрической части теплофотоэлектрического приемника:

$$\left\{ \begin{aligned} X_n &= R_n - (k-1) \cdot r_o, X_n = \left[4 \cdot f_1 \cdot (Y^* + Y_n^*) \right]^{\frac{1}{2}}, Y_n = \frac{R_n^2}{4} \cdot f_o, \\ \Delta\alpha &= \frac{\alpha_o}{N}, \alpha_n = \alpha_o \cdot \left(n - \frac{N}{2} \right), R = Y_n \cdot L - \frac{X_b^2}{4}, R_n = 2 \cdot f \cdot (\text{tg} \alpha_n + \cos \alpha_n), \\ \Delta Y^* &= \frac{X^{*2}}{4} \cdot f_1, Y_n^* = \Delta Y^* \cdot n, X^* = 2 \cdot f_1 \cdot Q \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{Q^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \Delta Y = \frac{P \cdot \left[1 \pm \left(1 - \frac{4 \cdot R}{P^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{2}, \\ Q &= \frac{B}{r_o}, B = h_o + h, P = L + Y_n, L = f_o + h + \frac{h_o}{2}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где R_n – радиус концентратора в зоне $a - c$ в точке с координатами X_n, Y_n поверхности параболы с фокусным расстоянием f_o ; α_n – угол между уровнем ординаты в точке с координатами X_n, Y_n и отраженным от поверхности параболы лучом, приходящим в фокальную область с шириной h_o , расположенной на радиусе r_o фотоприёмника в интервалах $\Delta\alpha = \alpha_o / N$, где n выбирается из ряда целых чисел $n = 1, 2, 3 \dots N$; α_o – угол между уровнем ординаты Y_b и лучом, отраженным от рабочей поверхности концентратора в точке с координатами X_b, Y_b и приходящим в нижнюю часть фокальной

области цилиндрического фотоприёмника с шириной h_o ; параметр h изменяется в пределах от 0 до h_o ; значения параметров f_o, f_1, k выбираются исходя из граничных условий в соответствии с методикой расчёта профиля концентратора и распределением концентрации на поверхности фотоприёмника.

Геометрическая концентрация освещенности фотоэлектрического приемника K_n в интервалах радиуса концентратора $\Delta R_n = R_{n+1} - R_n = \Delta X_n = X_n - X_{n-1}$ определяется как:

$$K_n = \frac{(R_{n+1}^2 - R_n^2)}{\Delta h_n}, \Delta h_n = \frac{(h_0 \cdot n)}{N} \quad (2)$$

Профиль отражающей поверхности зоны $c - d$ концентратора $X (Y)$ определяется системой уравнений, соответствующей условию распределения освещённости концентрированным

солнечным излучением всей поверхности тепловой части фотоприёмника, выполненного в виде усеченного конуса:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \beta = \frac{(Y_c - H_B)}{(R_c - r_{B0})}, \operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{h^*}{(r_0 - r_{B0}^*)}, \\ f_B = Y_c - X_c \cdot \operatorname{tg} \beta_B, r_B = X_c - R_c, \\ d^* = \frac{h^*}{\sin \varphi_0}, d_n^* = d^* \cdot \frac{n}{N}, \\ X_c = 2 \cdot Y_c \cdot \left(\frac{1}{\cos \beta_B} - \operatorname{tg} \beta_B \right), X_{Bn} = 2 \cdot f \cdot \left(\operatorname{tg} \gamma_{Bn} + \frac{1}{\cos \gamma_{Bn}} \right), \end{cases} \quad (3)$$

где β_0 – угол между уровнем ординаты в точке с координатами X_c, Y_c и отражённым от поверхности параболы с фокусным расстоянием f_0 лучом, приходящим в фокальную область усеченного конуса с радиусом r_0 фотоприёмника; γ_n – угол между уровнем ординаты в точке с координатами X_n, Y_n в зоне $c - d$ и отражённым от поверхности параболы с фокусным расстоянием f_0 лучом, приходящим в фокальную область усеченного конуса с шириной d^* фотоприёмника в интервалах $\Delta d^* = d^* / N$, где n выбирается из ряда целых чисел

$n = 1, 2, 3 \dots N$; φ_0 – угол наклона боковой поверхности усечённого конуса фотоприёмника; значения параметров f_0, φ_0 выбираются исходя из граничных условий в соответствии с методикой расчёта профиля концентратора и распределением концентрации на поверхности усечённого конуса.

Геометрическая концентрация освещённости теплового фотоприёмника K_n в интервалах радиуса концентратора $\Delta R_n = R_{n+1} - R_n = \Delta X_n = X_n - X_{n-1}$ определяется как:

$$K_n = \frac{(R_{n+1}^2 - R_n^2)}{(r_{n+1}^* + r_n^*) \cdot \Delta d^*} \quad (4)$$

На основании вышеприведённых формул произведён расчёт профиля отражающей поверхности концентратора солнечного излучения – график зависимости $X (Y)$ (рисунок 2 слева) и расчёт распределения концентрации освещённости от зон $a - b, b - c$ на боковую поверхность цилиндрического фотоэлектрического приёмника в зависимости от ширины фокальной области (от 0 до h_0) в

относительных единицах (от 0 до 1) (рисунок 2 посередине). На рисунке 2 справа представлено распределение концентрации освещённости от зоны $c - d$ по торцевой поверхности тепловой части фотоприёмника в виде усечённого конуса в зависимости от ширины фокальной области (от 0 до d^*) в относительных единицах (от 0 до 1).

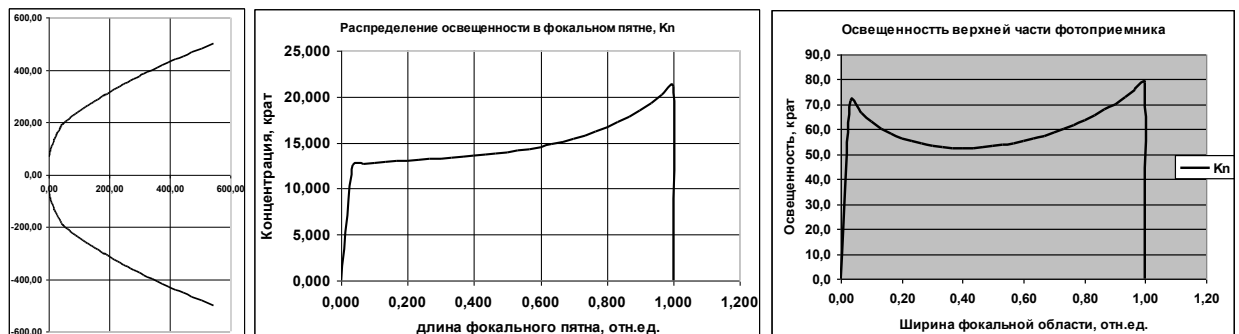


Рис. 2. Профиль отражающей поверхности концентратора (слева), распределение концентрации освещённости на фотоэлектрической (посередине) и тепловой частях фотоприёмника (справа)

Fig. 2. The profile of the reflecting surface of the concentrator (left), the distribution of the concentration of illumination on the photoelectric (in the middle) and the thermal parts of the photodetector (right)

Благодаря полученным расчётным профилям концентраторов с помощью систем автоматизированного проектирования появляется возможность создания их трёхмерных моделей. На рисунке 3 представлен пример такого концентратора солнечного излучения

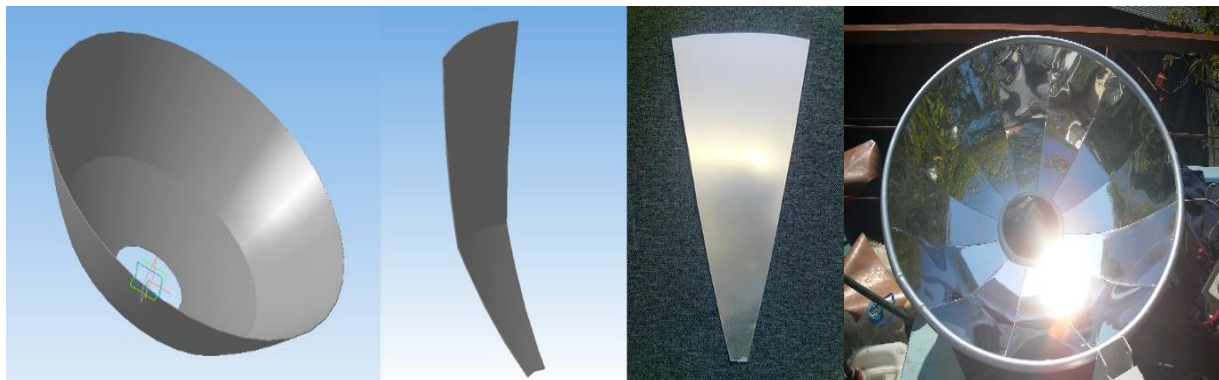


Рис. 3. Трёхмерная модель концентратора (слева), единичная его составная часть (посередине) и изготовленный концентратор из светоотражающего металла (справа)

Fig. 3. Three-dimensional model of the concentrator (left), its single component (in the middle) and the concentrator made of light-reflecting metal (right)

Разработанный концентратор солнечного излучения параболического типа комплектуется фотоприёмником для теплофотоэлектрического преобразования солнечного излучения. Фотоприёмник состоит из цилиндрического радиатора водяного охлаждения, теплоноситель которого обеспечивает теплосъём от кремниевых матричных фотоэлектрических преобразователей, находящихся на его поверхности. Электроизоляция фотоэлектрических преобразователей обеспечивается благодаря теплопроводящему и электроизоляционному слою на алюминиевом радиаторе, который получен с помощью микродугового оксидирования. С целью моделирования теплового состояния радиатора и его визуализации, разработана методика, которая реализуется в системе конечно-элементного анализа Ansys.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РАДИАТОРА ФОТОПРИЁМНИКА В СИСТЕМЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ANSYS

Моделирование теплового состояния радиатора водяного охлаждения фотоприёмника концентраторного солнечного модуля проводилось в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Для расчёта его теплового состояния разработана методика, для реализации которой в программных комплексах Autocad и ANSYS рассмотрены различные конструкции радиаторов и для каждой конструкции рассчитан тепловой режим работы.

Моделирование проводилось при следующих параметрах: плотность теплового потока 8200 Вт/м²; толщина кремниевого фотоэлектрического преобразователя 0,3 мм; теплопроводность кремния 149 Вт/(м·К); теплоёмкость кремния 800 Дж/(кг·К); плотность кремния 2300 кг/м³; теплопроводность алюминия 160 Вт/(м·К); теплоёмкость алюминия 880 Дж/кг·К; плотность алюминия 2800 кг/м³; толщина теплопроводной пасты 0,1 мм; теплопроводность теплопроводной пасты 1 Вт/(м·К); тепловой поток через боковую поверхность радиатора 300 Вт; тепловой поток через верхнюю поверхность радиатора 500 Вт; температура теплоносителя на входе радиатора 300 К; расход теплоносителя 1 л/мин. На рисунке 4 представлена конструкция одной из моделей радиатора, распределения температур радиатора, скорость воды и её линии течения.

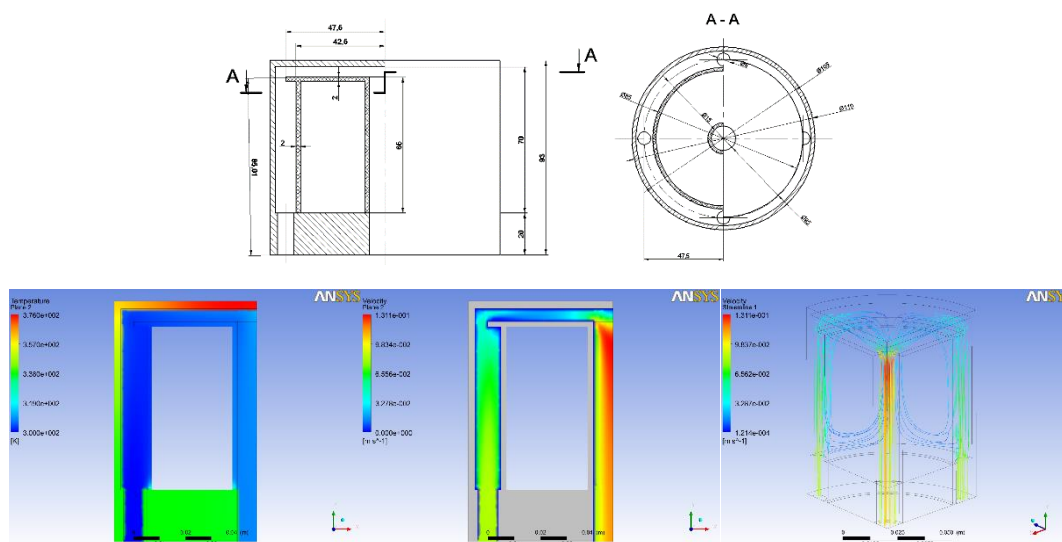


Рис. 4. Конструкция радиатора, распределение температур радиатора, скорость воды и её линии течения
Fig. 4. Radiator design, radiator temperature distribution, water velocity and its flow lines

Температуры воды на выходе из радиатора в 49 °С и температуры фотоэлектрических преобразователей в 59 °С удалось добиться при различных расходах теплоносителя (0,5 – 1 л/мин). При расходе теплоносителя, равном 0,25 л/мин, температура воды на выходе из радиатора повышается, но также происходит и перегрев фотоэлектрических преобразователей. Также следует отметить, что в когенерационной солнечной установке возможно использование различных рассмотренных конструкций радиаторов с различными расходами теплоносителя, но или с перегревом фотоэлектрических преобразователей или с недогревом воды на выходе из радиатора. Поэтому задача оптимизации температур являлась наиболее важной в этом вопросе

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ С

КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПАРАБОЛОИДНОГО ТИПА

В ходе натуральных испытаний исследованы два концентратора солнечного излучения параболического типа с теплофотоэлектрическим фотоприёмником. Концентраторы имеют различное назначение и диаметры: большой концентратор с диаметром 1 м является нагревающим, то есть он крепится к основному малому концентратору (0,6 м), благодаря чему увеличивается концентрация солнечного излучения на верхней поверхности фотоприёмника, увеличивая таким образом его температуру.

Внешний вид теплофотоэлектрической солнечной установки без концентратора с диаметром 1 м представлен на рисунке 5 слева. Внешний вид теплофотоэлектрической солнечной установки с двумя концентраторами, а также распределение освещённости по поверхности цилиндрического фотоприёмника представлены на рисунке 5 справа.



Рис. 5. Теплофотоэлектрический модуль с малым (слева) и с двумя концентраторами (справа)
Fig. 5. Photovoltaic thermal module with a small (left) and with two concentrators (right)

Концентратор солнечного излучения с диаметром 0,6 м предназначен для обеспечения равномерной освещённости боковой поверхности теплофотоэлектрического фотоприёмника, где располагаются фотоэлектрические

преобразователи, а концентратор с диаметром 1 м предназначен для повышения температуры теплоносителя, который омывает верхнюю поверхность цилиндрического фотоприёмника, что

увеличивает его температуру и общую эффективность солнечного модуля.

Сравнение вольтамперных характеристик фотоэлектрических преобразователей при естественном солнечном освещении.

В составе теплофотоэлектрического приёмника применяются четыре типа фотоэлектрических преобразователей (рисунок 6) – тонкий

двусторонний, круглый двусторонний, круглый односторонний и матричный фотоэлектрические преобразователи. Каждый тип фотоэлектрических преобразователей испытывался с целью определения его вольтамперной характеристики, мощности, коэффициента заполнения вольтамперной характеристики и коэффициента полезного действия.

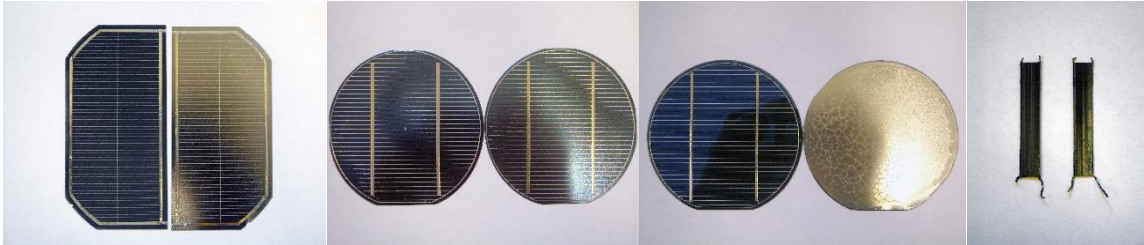


Рис. 6. Фотоэлектрические преобразователи, используемые в фотоприёмнике

Fig. 6. Photoelectric converters used in the photodetector

На рисунке 7 представлены вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей, используемых для резки и последующей сборки в фотоприёмник солнечного модуля. Обозначены параметры планарных фотоэлектрических преобразователей в рабочей точке.

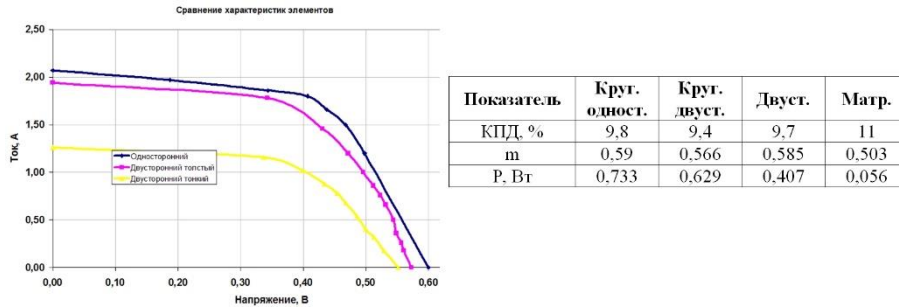


Рис. 7. Вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей

Fig. 7. Current-voltage characteristics of planar photoelectric converters

На рисунке 8 представлены вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей после резки по размерам 70 мм × 20 мм.

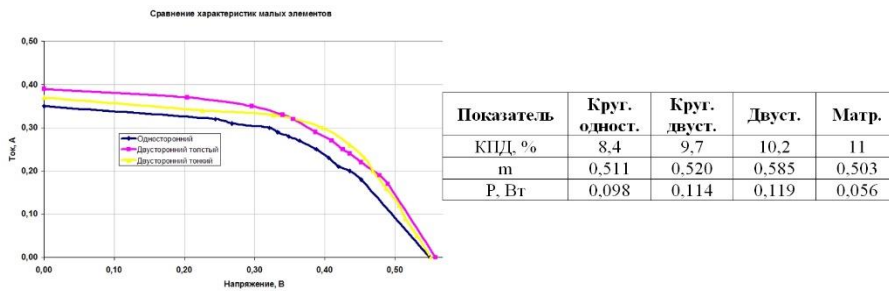


Рис. 8. Вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей после резки

Fig. 8. Current-voltage characteristics of planar photoelectric converters after cutting

Вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей, скоммутированных в группы, показаны на рисунке 9.

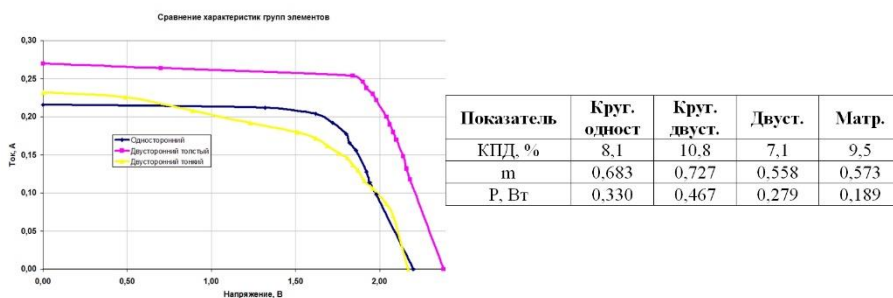


Рис. 9. Вольтамперные характеристики планарных фотоэлектрических преобразователей в группах
 Fig. 9. Current-voltage characteristics of planar photoelectric converters in groups

Как видно из представленных вольтамперных характеристик фотоэлектрических преобразователей при коммутации происходит небольшое ухудшение показателей электрической эффективности.

На рисунках 10 – 13 представлены вольтамперные характеристики каждой группы фотоэлектрических преобразователей при различных условиях освещения и охлаждения: при естественном солнечном освещении, без водяного охлаждения при работе в концентрированном солнечном излучении и с водяным охлаждением с различным расходом теплоносителя.

Сравнение вольтамперных характеристик групп фотоэлектрических преобразователей при различных условиях освещения и охлаждения.

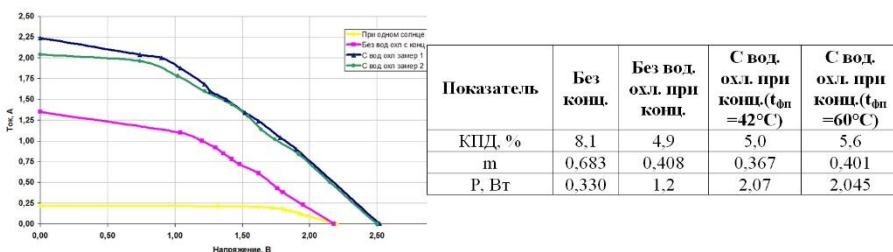


Рис. 10. Вольтамперные характеристики группы односторонних фотоэлектрических преобразователей
 Fig. 10. Current-voltage characteristics of a group of one-sided photoelectric converters

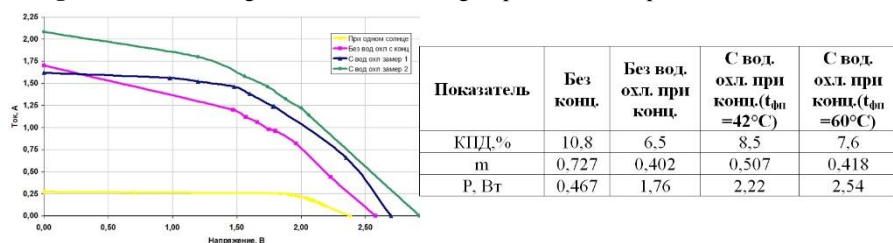


Рис. 11. Вольтамперные характеристики группы двусторонних фотоэлектрических преобразователей
 Fig. 11. Current-voltage characteristics of a group of two-sided photoelectric converters

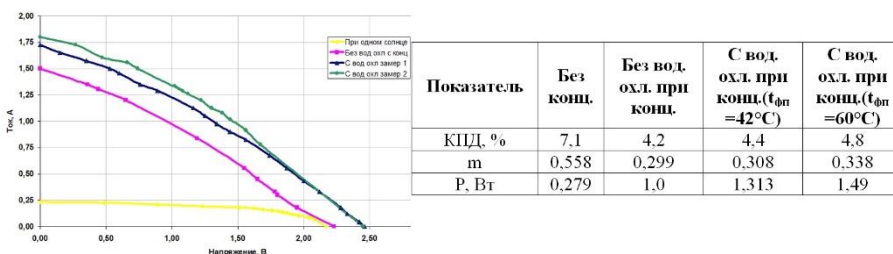


Рис. 12. Вольтамперные характеристики группы двусторонних тонких фотоэлектрических преобразователей
 Fig. 12. Current-voltage characteristics of a group of two-sided thin photoelectric converters

На основании графиков можно сделать вывод, что снижение электрической эффективности планарных фотоэлектрических преобразователей происходит в результате увеличения температуры при концентрации солнечного излучения без

охлаждения. Вольтамперные характеристики имеют треугольную форму из-за неблагоприятных условий работы (высокая температура и концентрация солнечного излучения).

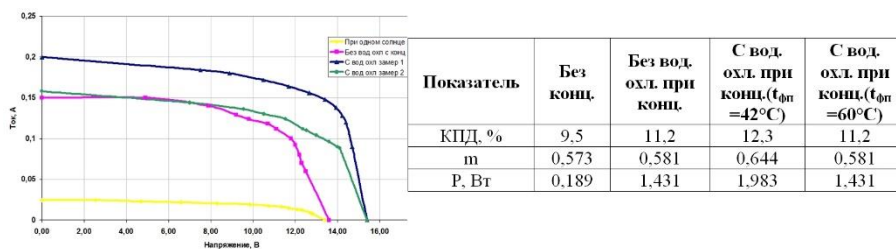


Рис. 13. Вольтамперные характеристики группы матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей
Fig. 13. Current-voltage characteristics of a group of matrix high-voltage photoelectric converters

Повышение температуры и концентрация солнечного излучения не так негативно влияют на электрическую эффективность матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей. Вольтамперные характеристики группы матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей имеют прямоугольную форму. Возможно повышение концентрации солнечного излучения при достаточном охлаждении, следствием чего будет увеличение электрической эффективности и выходной электрической мощности.

Электрическая эффективность солнечного теплофотоэлектрического модуля при работе с концентратором солнечного излучения параболического типа без учета оптических потерь увеличивается с 9,5 % до 12,3 %. С учетом оптических потерь $\eta_{opt} = 0,65$ электрическая эффективность составит 7,4 %, при учёте оптических потерь $\eta_{opt} = 0,8$ электрическая эффективность фотоэлектрического преобразования модуля повышается до 9,9 %, что говорит о целесообразности применения матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей в составе теплофотоэлектрической установки с концентраторами параболического типа.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЁННОСТИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИЁМНИКА

Распределение освещённости солнечного излучения от концентраторов параболического типа измерялось эталонным матричным высоковольтным фотоэлектрическим преобразователем с площадью 1 см² по всей высоте кольцевой фокальной области. Замеры распределения освещённости проводились с двух сторон поверхности цилиндрического фотоприёмника. В ходе экспериментов сделано 12 измерений по количеству facets, из которых изготовлен концентратор. Распределение освещённости от концентратора с диаметром 0,6 м представлено на рисунке 14 слева и посередине. Средняя концентрация составила около 7 крат. Распределение освещённости по верхней поверхности цилиндрического фотоприёмника от концентратора с диаметром 1 м представлено на рисунке 14 справа.

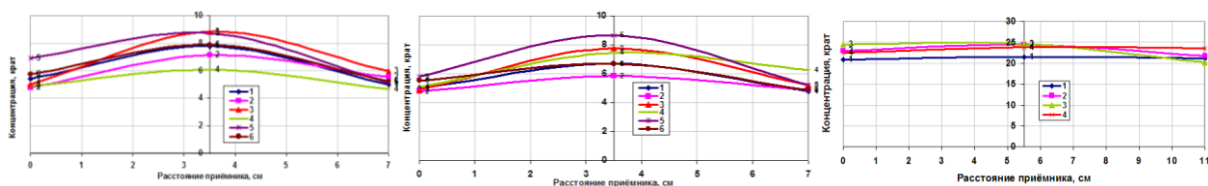


Рис. 14. Распределение освещённости на боковой поверхности фотоприёмника от концентратора с диаметром 0,6 м (слева и посередине) и распределение освещённости на верхней поверхности фотоприёмника от концентратора с диаметром 1 м (справа)

Fig. 14. Illumination distribution on the lateral surface of the photodetector from a concentrator with a diameter of 0,6 m (left and middle) and illumination distribution on the upper surface of the photodetector from a concentrator with a diameter of 1 m (right)

Концентрация по верхней поверхности цилиндрического фотоприёмника составила 20 – 25 крат, а средняя величина распределения концентрации составила 23 крат.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Наряду с вольтамперными характеристиками фотоэлектрических преобразователей большой интерес представляют тепловые параметры работы солнечного модуля. Тепловые характеристики боковой и верхней поверхностей цилиндрического радиатора фотоприёмника и поверхности фотоэлектрических преобразователей при освещении концентратором солнечного излучения с диаметром 0,6 м и воздушном охлаждении фотоэлектрических преобразователей представлены

на рисунке 15 (слева). В ходе эксперимента температура поверхности фотоэлектрических преобразователей составила 74 °С. Тепловые характеристики поверхностей цилиндрического радиатора фотоприёмника и поверхности фотоэлектрических преобразователей при освещении двумя концентраторами солнечного излучения с диаметрами 0,6 м и 1 м при воздушном охлаждении фотоэлектрических преобразователей представлены на рисунке 15 справа. При освещении двумя концентраторами температура радиатора сильно возросла, поэтому измерения проводились в короткий промежуток времени (1 мин), так как при более длительном нагреве от двух концентраторов и без водяного охлаждения происходит перегрев фотоэлектрических преобразователей.

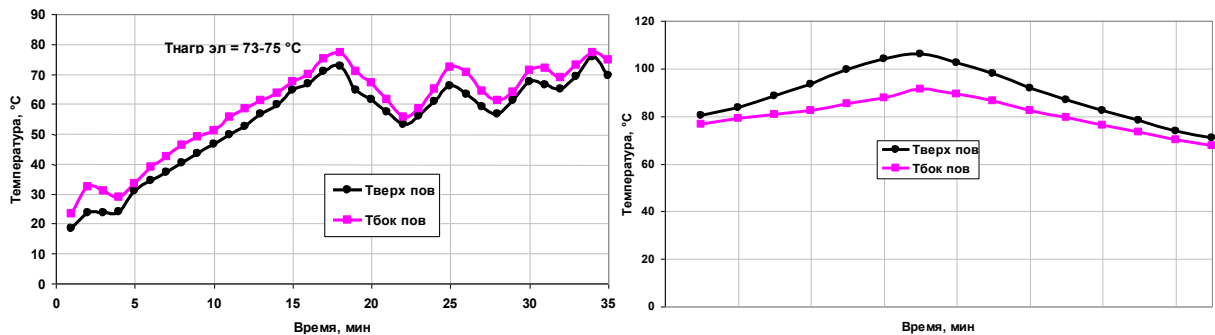


Рис. 15. Тепловые характеристики радиатора при работе с концентратором с диаметром 0,6м и воздушном охлаждении радиатора (слева) и при освещении двумя концентраторами с диаметрами 0,6 м и 1 м и воздушном охлаждении радиатора (справа)

Fig. 15. Thermal characteristics of the radiator when working with a concentrator with a diameter of 0,6 m and air cooling of the radiator (left) and when illuminated with two concentrators with diameters of 0,6 m and 1 m and air cooling of the radiator (right)

Тепловые характеристики поверхностей радиатора, поверхности фотоэлектрических преобразователей и величина расхода воды при освещении концентратором солнечного излучения с диаметром 0,6 м и водяном охлаждении представлены на рисунке 16 слева. Температура поверхности фотоэлектрических преобразователей в начале эксперимента составила 60 °С при расходе воды 0,3 л/мин. При увеличении расхода воды до 1,5

л/мин температура поверхности фотоэлектрических преобразователей уменьшилась до 42 °С. Тепловые характеристики поверхностей радиатора, поверхности фотоэлектрических преобразователей, величина расхода воды и её температура на выходе при освещении двумя концентраторами с диаметрами 0,6 м и 1 м с водяным охлаждением радиатора представлены на рисунке 16 справа.

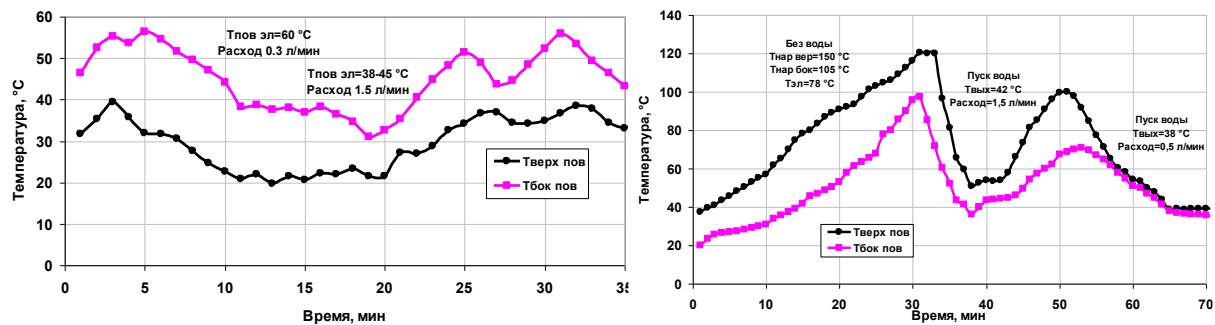


Рис. 16. Тепловые характеристики радиатора и расход воды при освещении концентратором с диаметром 0,6 м и водяном охлаждении радиатора (слева) и при освещении двумя концентраторами с диаметрами 0,6 м и 1 м и водяном охлаждении радиатора (справа)

Fig. 16. Thermal characteristics of the radiator and water flow when illuminated by a concentrator with a diameter of 0,6 m and water cooling of the radiator (left) and when illuminated by two concentrators with diameters of 0,6 m and 1 m and water cooling of the radiator (right)

Температура поверхности фотоэлектрических преобразователей в начале эксперимента составила 78 °С без водяного охлаждения радиатора, а температуры верхней и боковой поверхностей радиатора составили 150 °С и 105 °С соответственно. При расходе воды 1,5 л/мин температура воды на выходе из радиатора составила 42 °С. При уменьшении расхода воды до 0,5 л/мин её температура на выходе из радиатора составила 38 °С.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований обосновано эффективное использование концентраторов солнечного излучения параболического типа совместно с кремниевыми матричными высоковольтными фотоэлектрическими преобразователями. Предложенная методика расчёта рабочего профиля концентратора солнечного излучения обеспечивает увеличение электрической эффективности и необходимое распределение освещённости на поверхности цилиндрического фотоприёмника. Проведённые расчёты тепловых режимов работы радиатора водяного охлаждения фотоэлектрических преобразователей в системе конечно-элементного анализа Ansys позволяют визуализировать тепловое состояние радиатора, оптимизировать параметры конструкции теплофотоэлектрического модуля и самого фотоприёмника.

Разработаны и изготовлены фотоприёмники концентрированного солнечного излучения с планарными и матричными фотоэлектрическими преобразователями. На основании проведенных натурных испытаний солнечного теплофотоэлектрического модуля типа при различных условиях освещения и охлаждения доказано, что электрическая эффективность матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей без учета оптических потерь увеличивается с 9,5 % до 12,3 %, что подтверждает целесообразность применения матричных высоковольтных фотоэлектрических преобразователей в составе теплофотоэлектрической установки с концентраторами солнечного излучения параболического типа. При расходах воды 0,5 – 1,5 л/мин температура воды на выходе из радиатора составила 38 – 42 °С. В зависимости от расхода теплоносителя возможно регулирование его температуры на выходе.

При использовании концентраторного теплофотоэлектрического солнечного модуля следует отметить такие положительные аспекты, как экономия кремния высокой степени очистки, наряду с электрической энергией потребитель получает и тепловую энергию, при промышленном изготовлении разработанных солнечных модулей с использованием матричных фотоэлектрических преобразователей с электрической эффективностью более 15 % стоимость установленной электрической

мощности будет меньше стоимости установленной мощности планарных солнечных модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекиров Э.А., Асанов М.М., Алькаата А. Оптимизация режимов работы систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Строительство и техногенная безопасность, 13(65), 2018, с. 107-112.
2. Гапеева Н.А., Жиленко О.Б. Автономное теплоснабжение высотных зданий. Строительство и техногенная безопасность, 10(62), 2018, с. 77-89.
3. Новикова О.В., Мельниченко А.С., Лучникова А.Д. Методические подходы к энергоснабжению с использованием возобновляемых источников энергии на объектах транспортной инфраструктуры федерального значения. Строительство и техногенная безопасность, 12(64), 2018, с. 81-90.
4. Амерханов Р.А., Бекиров Э.А., Асанов М.М. Методы оптимизации работы теплоэлектростанции при совместной генерации с ветро- и солнечной электростанциями. Строительство и техногенная безопасность, 14(66), 2019, с. 93-100.
5. Голикова А.А., Нагаева З.С. Пассивный дом (экодом). Строительство и техногенная безопасность, 14(66), 2019, с. 15-20.
6. Дегтярёв К.С., Панченко В.А. Развитие и реализованные проекты солнечной энергетики в России. Сантехника, отопление, кондиционирование, №9, 2019, с. 74-79.
7. Панченко В.А. Перспективы энергоснабжения объектов арктической зоны РФ с помощью морозостойких солнечных модулей различной конструкции. Строительство и техногенная безопасность, 17(69), 2019, с. 69 – 88.
8. Соловьев А.К. Экономия энергии при эксплуатации зданий и пассивные системы использования солнечной энергии. Строительство и техногенная безопасность, 10(62), 2018, с. 179-191.
9. Муровский С.П., Сокут Л.Д. Перспективные направления модернизации солнечных электростанций Республики Крым. Строительство и техногенная безопасность, 15(67), 2019, с. 149-158.
10. Гвоздкова Ю. Д., Гвоздкова И. А. Многокритериальная эколого-ориентированная оценка энергоустановок на основе фотоэлементов с различным материалом активного слоя. Строительство и техногенная безопасность, 17(69), 2019, с. 89-102.
11. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ. Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 – 29.
12. Стребков Д.С., Бобовников Н.Ю., Иродионов А.Е., Кирсанов А.И., Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Программа "Один миллион солнечных крыш" в России. Вестник ВИЭСХ, 2016, № 3 (24), с.84 – 87.
13. Panchenko V. Photovoltaic solar modules for autonomous heat and power supply. IOP Conference

Series: Earth and Environmental Science 317 (2019) 012002, 9 p. doi:10.1088/1755-1315/317/1/012002.

14. Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Y. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, Volume 9 Issue 2, 2020, pp. 74 – 94, DOI: 10.4018/IJEOE.2020040106.

15. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А., Осьмаков М.И., Плохих С.А. Солнечная установка с матричными фотоэлементами и концентратором. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*, 2013, № 2, с. 50-52.

16. Стребков Д.С., Поляков В.И., Панченко В.А. Исследование высоковольтных солнечных кремниевых модулей. *Альтернативная энергетика и экология*, 2013, № 6-2 (128), с. 36-42.

17. Стребков Д.С., Поляков В.И., Арбузов Ю.Д., Панченко В.А. Высоковольтные солнечные модули третьего поколения. *Инновации в сельском хозяйстве*, № 3(8), 2014, с. 159 – 165.

18. Панченко В.А., Стребков Д.С., Поляков В.И., Арбузов Ю.Д. Высоковольтные солнечные модули с напряжением 1000 В. *Альтернативная энергетика и экология*, 2015, № 19 (183), с. 76 – 81.

19. Бекиров Э.А., Асанов М.М. Анализ систем водяного охлаждения фотоэлектрических панелей. *Строительство и техногенная безопасность*, 6(58), 2017, с. 55-59.

20. Асанов М.М., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н. Снижение влияния нагрева поверхности фотоэлемента на эффективность его работы. *Строительство и техногенная безопасность*, 51, 2014, с. 92-97.

21. Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. *Строительство и техногенная безопасность*, 15(67), 2019, с. 141-148.

22. Бекиров Э.А., Каркач Д.В. Двумерная модель тепловых процессов в солнечном коллекторе и ее экспериментальная проверка. *Строительство и техногенная безопасность*, 10(62), 2018, с. 191-201.

23. Панченко В.А., Чирский С.П. Разработка и исследование солнечных теплофотоэлектрических модулей в системах автоматизированного проектирования и конечно-элементного анализа // *Строительство и техногенная безопасность*, №14(66), 2019, с. 57 – 72.

24. Панченко В.А. Моделирование теплофотоэлектрической кровельной панели для энергоснабжения объектов // *Строительство и техногенная безопасность*, №13 (65), 2018, с. 143 – 158.

25. Сеницын С.А. Моделирование линейных погрешностей при конструировании поверхности концентратора солнечного модуля. *Научный электронный журнал Меридиан*, № 4 (38), 2020, с. 219-221.

26. Сеницын С.А. Энтропийная погрешность при моделировании конструктивных форм

теплофотоэлектрических солнечных модулей. *Научный электронный журнал Меридиан*, № 3 (37), 2020, с. 438-440.

27. Сеницын С.А. Информационная методика управления качеством поверхности солнечного концентратора, заданной дискретным множеством точек. *E-Scio*, № 1 (40), 2020, с. 421-427.

28. Сеницын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А. Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям. *Геометрия и графика*, Т. 7, № 3, 2019, с. 15-27.

29. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения – М, ГНУ ВИЭСХ, 2007, с. 12-30.

REFERENCES

1. Bekirov E.A., Asanov M.M., Alkaata A. Optimization of operating modes of power supply systems using renewable energy sources. *Construction and technogenic safety*, 13(65), 2018, 107-112.

2. Gapeeva N.A., Zhilenko O.B. Autonomous heat supply of high-rise buildings. *Construction and technogenic safety*, 10(62), 2018, 77-89.

3. Novikova O.V., Melnichenko A.S., Luchnikova A.D. Methodological approaches to energy supply using renewable energy sources at the objects of transport infrastructure of federal significance. *Construction and technogenic safety*, 12(64), 2018, 81-90.

4. Amerkhanov R.A., Bekirov E.A., Asanov M.M. Methods for optimizing the operation of a thermoelectric power station during joint generation with wind and solar power plants. *Construction and technogenic safety*, 14(66), 2019, 93-100.

5. Golikova A.A., Nagaeva Z.S. Passive house (eco house). *Construction and technogenic safety*, 14(66), 2019, 15-20.

6. Degtyarev K.S., Panchenko V.A. Development and completed solar energy projects in Russia. *Plumbing, heating, air conditioning*, No. 9, 2019, p. 74-79.

7. Panchenko V.A. Prospects for energy supply of the objects of the Arctic zone of the Russian Federation using frost-resistant solar modules of various designs. *Construction and technogenic safety*, 17(69), 2019, p. 69 - 88.

8. Soloviev A.K. Energy savings in building operations and passive solar systems. *Construction and technogenic safety*, 10(62), 2018, 179-191.

9. Murovsky S.P., Sokut L.D. Promising areas of modernization of solar power plants in the Republic of Crimea. *Construction and technogenic safety*, 15(67), 2019, 149-158.

10. Gvozdikova Yu. D., Gvozdikova I.A. Multicriteria environmental-oriented assessment of power plants based on photocells with various active layer materials. *Construction and technogenic safety*, 17(69), 2019, p. 89-102.

11. Panchenko V.A. Review and application of solar modules developed and manufactured by GNU VIESH. *Vestnik VIESH*, 2014, No. 4 (17), p. 20 - 29.
12. Strebkov D.S., Bobovnikov N.Yu., Irodionov A.E., Kirsanov A.I., Panchenko V.A., Filippchenkova N.S. The One Million Solar Roofs program in Russia. *Vestnik VIESH*, 2016, 3(24), 84-87.
13. Panchenko V. Photovoltaic solar modules for autonomous heat and power supply. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 317 (2019) 012002, 9 p. doi:10.1088/1755-1315/317/1/012002.
14. Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Y. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, Volume 9 Issue 2, 2020, pp. 74 – 94, DOI: 10.4018/IJEOE.2020040106.
15. Strebkov D.S., Mayorov V.A., Panchenko V.A., Osmakov M.I., Plohih S.A. Solar installation with matrix photocells and a concentrator. *Electro. Electrical Engineering. Electric Power Industry. Electrical Engineering Industry*, 2013, 2, 50-52.
16. Strebkov D.S., Polyakov V.I., Panchenko V.A. Study of high voltage solar silicon modules. *Alternative Energy and Ecology*, 2013, No. 6-2 (128), p. 36-42.
17. Strebkov D.S., Polyakov V.I., Arbuzov Yu.D., Panchenko V.A. High-voltage solar modules of the third generation. *Innovations in Agriculture*, No. 3 (8), 2014, p. 159 - 165.
18. Panchenko V.A., Strebkov D.S., Polyakov V.I., Arbuzov Yu.D. High-voltage solar modules with a voltage of 1000 V. *Alternative Energy and Ecology*, 2015, No. 19 (183), p. 76 - 81.
19. Bekirov E.A., Asanov M.M. Analysis of water cooling systems for photovoltaic panels. *Construction and technogenic safety*, 6(58), 2017, 55-59.
20. Asanov M.M., Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N. Reducing the effect of heating the surface of the solar cell on its efficiency. *Construction and technogenic safety*, 51, 2014, 92-97.
21. Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Ptotovoltaic thermal installation for the combined generation of thermal and electrical energy. *Construction and technogenic safety*, 15(67), 2019, 141-148.
22. Bekirov E.A., Karkach D.V. Two-dimensional model of thermal processes in the solar collector and its experimental verification. *Construction and technogenic safety*, 10(62), 2018, 191-201.
23. Panchenko V.A., Chirsky S.P. Development and research of solar photovoltaic thermal modules in computer-aided design and finite element analysis systems. *Construction and technogenic safety*, 14(66), 2019, 57-72.
24. Panchenko V.A. Modeling of a photovoltaic roofing panel for power supply of objects. *Construction and technogenic safety*, 13(65), 2018, 143-158.
25. Sinitsyn S.A. Modeling linear errors in the design of the surface of the concentrator of the solar module. *Scientific electronic journal Meridian*, No. 4 (38), 2020, p. 219-221.
26. Sinitsyn S.A. Entropy error in modeling structural forms of photovoltaic thermal solar modules. *Scientific electronic journal Meridian*, No. 3 (37), 2020, p. 438-440.
27. Sinitsyn S.A. Informational technique for controlling the surface quality of a solar concentrator defined by a discrete set of points. *E-Scio*, No. 1 (40), 2020, p. 421-427.
28. Sinitsyn S.A., Strebkov D.S., Panchenko V.A. Surface parqueting for a parabolic concentrator of a solar photovoltaic thermal module according to specified differential geometric requirements. *Geometry and Graphics*, vol. 7, 3, 2019, 15-27.
29. Strebkov D.S., Tveryanovich E.V. Concentrators of solar radiation - M, GNU VIESH, 2007, p. 12-30.

PHOTOVOLTAIC THERMAL MODULE WITH CONCENTRATORS OF THE SOLAR RADIATION OF A PARABOLOID TYPE

Panchenko^{1,2} V.A.¹ Russian university of transport, Moscow, Obraztsova str., tu@miit.ru² Federal scientific agroengineering center VIM, 109428, Moscow, 1-st Institutsky proezd, 5, vim@vim.ru

Annotation. The article presents the results of the development and research of a solar photovoltaic thermal module with paraboloid-type solar radiation concentrators. The composition of the solar module includes a composite concentrator, which provides uniform illumination by concentrated solar radiation on the surface of a cylindrical photovoltaic thermal photodetector in the form of an aluminum radiator with photoelectric converters. The developed method for calculating the working profile of the concentrator makes it possible to provide the necessary distribution of illumination in its focal region. A thin heat-conducting dielectric layer is formed on the surface of the radiator using microarc oxidation, on which planar and matrix photoelectric converters are fixed. When exposed to concentrated solar radiation, the electrical efficiency of specially designed matrix photoelectric converters increases, and the heat taken by the heat carrier increases the overall efficiency of the solar module. To visualize the thermal state of the water-cooling radiator of photoelectric converters, a calculation procedure has been developed that is implemented in the Ansys finite element analysis software package and allows visualizing the thermal fields and coolant flows in the radiator. As a result of studies of the concentrator photovoltaic thermal module, an increase in the efficiency of matrix photoelectric converters with the simultaneous receipt of warm water at the outlet was obtained. Uniform illumination of photovoltaic converters with concentrated solar radiation provides an optimal mode of operation. The consumer can use the received electric and thermal energy in an autonomous or parallel power supply with the existing power grid.

Subject of research: the paraboloid type solar radiation concentrator providing uniform illumination by concentrated radiation on the surface of a photovoltaic thermal photodetector with silicon planar and matrix photoelectric converters, the heat removed from which is used by the consumer, thereby increasing the overall module efficiency.

Materials and methods: to create the design documentation for the solar module, the COMPASS 3D computer-aided design system was used; to simulate and visualize the thermal state of a water-cooled radiator with photoelectric converters, the ANSYS finite element analysis system was used; microarc oxidation technology was used to electrically isolate the surface of an aluminum radiator; for the manufacture of a solar module photodetector, encapsulation technology with a two-component polysiloxane compound was used; for field tests of the solar photovoltaic thermal module, a measuring system was used to record the electrical and temperature parameters of the module.

Results: as a result of the calculations and studies, the solar photovoltaic thermal module with paraboloid type solar concentrators with matrix photoelectric converters with uniform illumination on their surface is developed, manufactured and tested, their electrical efficiency increases, and with the help of the removed heat it becomes possible to increase the overall efficiency of the solar module.

Conclusions: methods have been developed that allow calculating the working profile of a paraboloid-type solar radiation concentrator that provides uniform illumination in the focal region, and visualizing using the finite element analysis system the thermal state and flow of the radiator coolant in focus of the concentrator. The electrical efficiency of matrix photoelectric converters increases in the concentrated solar stream due to the uniformity of illumination. The heat carrier, taking heat from the photoelectric converters, cools them, thereby increasing their electrical efficiency, and the heat obtained can be used by the consumer. Thus, not only the electrical efficiency of the module is increased, but also the thermal efficiency, which increases the overall efficiency of the module. The consumer can use the received electric and thermal energy from the solar photovoltaic thermal module in an autonomous or parallel power system.

Key words: solar energy, solar concentrator, photovoltaic thermal module, finite element analysis system, matrix photoelectric converters, current-voltage characteristic, efficiency, energy supply.