

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392>

УДК 620.91; 621.383.51

Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения

А. К. Есман¹⁾, Г. Л. Зыков¹⁾, В. А. Потачиц¹⁾, В. К. Кулешов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Солнечная энергетика является одним из наиболее важных и перспективных секторов энергетики в мире. Батареи, которые преобразуют солнечный свет в электрическую энергию, могут стать заменой традиционным углеродным источникам энергии. Вертикальные тонкопленочные солнечные батареи – это один из новых подходов к генерации солнечной энергии. Вертикальное расположение солнечных панелей обеспечивает максимальное поглощение солнечного света на протяжении всего дня. Такая ориентация позволяет батареям получать солнечную энергию даже при низком угле падения солнечных лучей, что увеличивает время работы и повышает эффективность производства электроэнергии. В данной работе предложена трехмерная модель вертикально ориентированной солнечной батареи, а также выполнен расчет и произведена оценка температурных характеристик и КПД, получаемых в условиях изменения температуры окружающей среды. При этом варьировались плотности мощности концентрированного солнечного излучения с максимальными значениями от 1 до 10 кВт/м². Изучено распределение и построены зависимости максимальных значений температуры солнечной батареи и градиента температуры внутри нее, а также зависимости минимальных и максимальных значений теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток в серединах января и июля. Как показали расчеты, максимальные значения градиента температуры внутри солнечной батареи в январе на ~47–50 % выше, чем в июле. Разность потенциалов, генерируемая батареей, достигает максимальных значений с 11:00 до 16:00 как в январе, так и в июле. Использование вертикальных тонкопленочных солнечных батарей позволит повысить эффективность выработки электроэнергии и уменьшить эксплуатационные расходы за счет снижения влияния пыли, дождя и снега.

Ключевые слова: солнечная панель, CuInSe₂, трехмерная имитационная модель, Comsol Multiphysics, теплопередача, стабилизация температуры, градиент температуры, тепловой поток, КПД

Для цитирования: Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392>

Адрес для переписки

Есман Александр Константинович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

Address for correspondence

Esman Alexander K.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation

A. K. Esman¹⁾, G. L. Zykov¹⁾, V. A. Potachits¹⁾, V. K. Kuleshov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Solar energy is one of the most important and promising energy sectors in the world. Batteries that convert sunlight into electrical energy could become a replacement for traditional carbon-based energy sources. Vertical thin-film solar batteries are one of the new approaches to solar energy generation. The vertical configuration of solar panels provides maximum absorption of sunlight throughout the day. This orientation allows the batteries to capture solar energy even at low angles of incidence of the sun's rays, which prolongs their operating time and improves the efficiency of electricity production. In this work, the authors proposed a three-dimensional model of a vertically oriented solar battery, as well as they calculated and evaluated the temperature characteristics and the efficiency obtained under conditions of changing ambient temperature. Herewith the power densities of concentrated solar radiation with maximum values from 1 to 10 kW/m² were varied. The distribution of the maximum values of the surface temperature of the solar battery has been studied. Also, the dependences of the maximum values of the solar battery temperature and the temperature gradient inside it, as well as the dependences of the minimum and maximum values of the heat flux from the solar battery surface on the time of day in the middle of January and July have been studied and plotted. As the calculations have shown, the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery in January are ~47–50 % higher than in July. The potential difference, generated by the battery, reaches its maximum values from 11 a.m. to 4 p.m. both in January and July. The use of vertical thin-film solar batteries will improve the power generation efficiency and lower operating costs by reducing the influence of dust, rain and snow.

Keywords: solar panel, CuInSe₂, 3D simulation model, Comsol Multiphysics, heat transfer, temperature stabilization, temperature gradient, heat flux, efficiency

For citation: Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2024) Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392> (in Russian)

Введение

Отрасль солнечной энергетики постепенно расширяется, так как экологическая повестка приобретает все большую актуальность. В 2022 г. солнечная энергетика выросла на 240 ГВт, то есть достигла 1185 ГВт. Ожидается в 2024 г. прирост глобальных мощностей солнечной энергетики более чем на 350 ГВт с учетом ввода в эксплуатацию солнечных электростанций. Одним из путей увеличения генерации электричества и стабилизации его производства является выбор географического месторасположения и угла наклона солнечных панелей. Обычно эти панели располагают под углом 20–35° по отношению к земле. Однако исследования показали, что выработка энергии увеличится, если ставить панели под углом 90° [1]. Ученые подсчитали, что вертикальные панели позволят существенно повысить общее производство энергии, тем самым уменьшить число установок, работающих на ископаемом топливе, которые обычно используются при высоком спросе на электроэнергию (утро и вечер). Еще одним пре-

имуществом вертикально ориентированных солнечных батарей является возможность экономии земельных угодий. Кроме того, рассматриваемые батареи имеют гибкую конструкцию и могут быть размещены на различных поверхностях, включая стены зданий или столбы, что открывает дополнительные возможности для их использования [2, 3].

Целью статьи являются разработка имитационной модели солнечной батареи с вертикальной ориентацией ее модулей и оценка основных параметров в реальных условиях эксплуатации.

Конструкция вертикальной солнечной батареи

Конструкция предлагаемой солнечной батареи с вертикальной ориентацией ее модулей приведена на рис. 1 [4].



Рис. 1. Структура вертикальной тонкопленочной солнечной батареи:

1 – нанопленка окиси кремния; 2 – корпус из силикатного стекла; 3 – герметик, 4 – фотоэлектрический преобразователь на основе CuInSe_2 с лицевым прозрачным электродным слоем (на рис. не указан); 5 и 7 – электродные слои; 6 – термоэлектрический преобразователь на основе CuInSe_2 ; 8 – радиатор

Fig. 1. The structure of the vertical thin-film solar battery: 1 – silicon oxide nanofilm; 2 – silicate glass case; 3 – sealant; 4 – CuInSe_2 -based photoelectric converter with a transparent front electrode layer (not shown in the figure); 5 and 7 – electrode layers; 6 – thermoelectric converter based on CuInSe_2 ; 8 – radiator

Солнечная батарея включает в себя радиатор 8 с вертикальными пазами, термически связанный с тыльной стороной вертикально ориентированного термоэлектрического преобразователя 6 через вертикальный электродный слой 7 и далее – с тыльной стороной фотоэлектрического преобразователя 4 – через вертикальный электродный слой 5. Фронтальная сторона фотоэлектрического преобразователя механически и оптически соединена с корпусом 2 посредством герметика 3 через лицевой прозрачный электродный слой. На внешней вертикальной поверхности корпуса расположена нанопленка окиси кремния 1.

Для обеспечения максимального проникновения солнечного света и минимизации потерь энергии внутри солнечной батареи выбираются гер-

метики с коэффициентом преломления, приближенным к коэффициенту преломления силикатного стекла. Это позволяет снизить отражение света и повысить эффективность преобразования солнечной энергии. Однако конкретный диапазон значений коэффициента преломления герметика может варьироваться в зависимости от выбранных материалов, конструкции и требований, предъявляемых к солнечной батарее. Важно учитывать также факторы, такие как механическая прочность, стойкость к воздействию внешней среды и улучшение теплового отвода. Коэффициент преломления n герметика нами был выбран исходя из условия

$$n_M < n < n_{SM}, \quad (1)$$

где n_M и n_{SM} – коэффициенты преломления соответственно силикатного стекла и фотоэлектрического преобразователя.

Нанопленка окиси кремния (размером $100 \times 178 \times 178$ мм) представляет собой тонкий слой наночастиц окиси кремния, полученных из коллоидного раствора. Нанопленка прочно прикреплена к корпусу из силикатного стекла (размером $3 \times 178 \times 178$ мм) и образует сплошной слой наноразмерных бугорков, обладающих самоупорядочивающимися свойствами, которые препятствуют скапливанию на нанопленке капель воды, снега, частиц пыли и т. д. Герметик представляет собой силиконовый прозрачный самополимеризующийся клей. Коэффициент преломления n герметика выбран согласно условию (1) с учетом того, что силикатное стекло корпуса вместе с герметиком являются просветляющим покрытием с минимальным отражением солнечного излучения для фотоэлектрического преобразователя (размером $1 \text{ мкм} \times 178 \text{ мм} \times 166 \text{ мм}$), который электрически соединен с электродным слоем 5. Термоэлектрический преобразователь подключен к электродным слоям 5 и 7. Радиатор из алюминиевого сплава Д16Т термически соединен с электродным слоем 7.

Алгоритм работы вертикальной тонкопленочной солнечной батареи

Тонкопленочную солнечную батарею устанавливают фронтальной стороной в южном направлении. Солнечное излучение поступает на нанопленку окиси кремния как непосредственно, так и после отражения от ровной подстилающей поверхности (например, воды или снега). После прохождения через нанопленку окиси кремния, силикатное стекло корпуса, а также герметик оно поступает на фотоэлектрический преобразователь. С одной стороны, в фотоэлектрическом преобразователе происходит поглощение падающего солнечного излучения, в результате чего генерируются электрические заряды, а с другой стороны, солнечное излучение (его инфракрасная часть) нагревает фотоэлектрический преобразователь. Сгенерированные заряды разделяются электрическим полем $p-n$ перехода, создавая фото-ЭДС между лицевым прозрачным электродным слоем

и электродным слоем 5. Часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует, что приводит к нагреву фотоэлектрического преобразователя и появлению градиента температур между электродными слоями 5 и 7. Это, в свою очередь, вызывает термоЭДС между боковыми сторонами термоэлектрического преобразователя, электрически соединенными с электродными слоями 5 и 7. Поэтому генерируется выходное напряжение солнечной батареи, включающее фото- и термоЭДС, между лицевым прозрачным электродным слоем и электродом 7.

Радиатор позволяет повысить эффективность рассеивания тепловой энергии в окружающую среду и тем самым выровнять его температуру с температурой окружающей среды. Более того, рассматриваемая солнечная батарея обладает свойством самоочищения входной апертуры и тем самым снижает частоту очистки устройства.

Компьютерное моделирование

Трехмерная модель вертикально ориентированной солнечной батареи разработана и оптимизирована в программной среде COMSOL Multiphysics [5, 6]. С использованием модуля Heat Transfer (теплопередача) исследовано функционирование солнечной батареи в определенный день (например, 15 января и 15 июля) в заданном местоположении (например, выбраны географические координаты г. Минска). Описанный анализ с помощью опции Solar Position позволяет определить направление и интенсивность солнечного излучения, учитывая географические координаты и время суток, и более точно моделировать работу солнечной батареи в зависимости от угла падения солнечных лучей [7]. Радиационная теплопередача между элементами солнечной батареи позволила учесть влияние тепловых процессов на работу устройства. Учет суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и интенсивности солнечного излучения спектра AM1,5 является важным фактором для оптимальной эксплуатации солнечной батареи в различных условиях. Максимальное значение плотности мощности P_{\max} солнечного излучения варьировалось от 1 до 10 кВт/м². Расчет характеристик солнечной батареи выполнялся с учетом стабилизации температуры тыльной стороны радиатора на уровне температуры окружающей среды.

В условиях устойчивой ясной погоды суточный ход температуры проявляется достаточно четко, но в отдельные дни могут наблюдаться существенные изменения, приводящие к сложной форме его кривой. Эти изменения вызываются различными факторами, такими как облачность, приток воздушных масс с другой температурой и др. В результате минимум этой кривой может сместиться даже на дневные часы, а максимум – на ночь. В климатологии обычно рассматривается суточный ход температуры воздуха, осредненный за длительный период времени, чтобы скомпенсировать непериодические изменения. В результате такого усреднения кривая суточного хода температуры становится приближенной к синусоиде

$$T_{amb}(t) = T_{avg} + \Delta T \cos\left(2\pi \frac{t-14}{24}\right),$$

где T_{avg} и ΔT – средняя температура воздуха и половина суточного изменения температуры соответственно; t – время суток, ч.

При моделировании использовалась функция $T_{amb}(t)$, а средние минимальная ($T_{avg} - \Delta T$) и максимальная ($T_{avg} + \Delta T$) месячные температуры воздуха в г. Минске были взяты с сайта <http://belmeteo.net>. Кроме того, в зависимости от географического положения и времени суток определялись углы падения солнечного излучения на солнечную батарею.

Как следует из [8], построение расчетной сетки представляет собой важный и трудоемкий этап создания модели солнечной батареи методом конечных элементов, так как это влияет на эффективность использования вычислительных ресурсов. В Comsol Multiphysics имеются 4 типа конечных элементов: тетраэдры, гексаэдры, треугольные призмы и пирамиды, а также 9 предустановленных размеров: от очень мелкого (Extremely fine) до очень крупного (Extremely coarse). В качестве конечных элементов для построения сетки солнечной батареи выбраны тетраэдры, так как с их помощью можно разделить и аппроксимировать любой геометрический объект со сколько угодно сложной топологией (рис. 2).

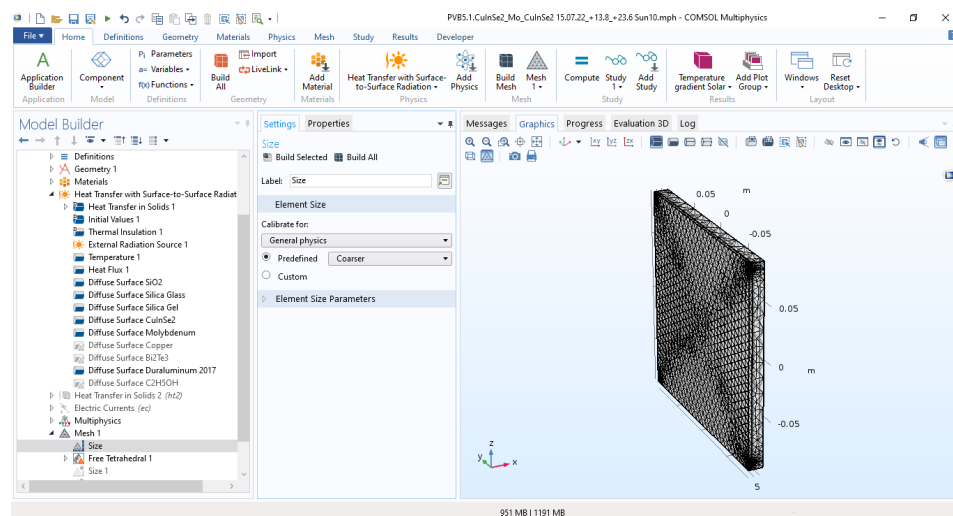


Рис. 2. Скриншот операции построения сетки солнечной батареи в виде тетраэдров в программной среде Comsol Multiphysics

Fig. 2. Screenshot of the grid construction of the solar battery in the form of tetrahedrons in the Comsol Multiphysics software environment

Анализ полученных результатов

Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи осуществлялось в условиях изменения температуры окружающей среды и воздействия солнечного излучения спектра AM1,5. Показано, что происходит

преимущественно равномерный нагрев ее поверхностных слоев, за исключением торцевых сторон, температура которых в полдень значительно больше температуры остальных поверхностей батареи (рис. 3).

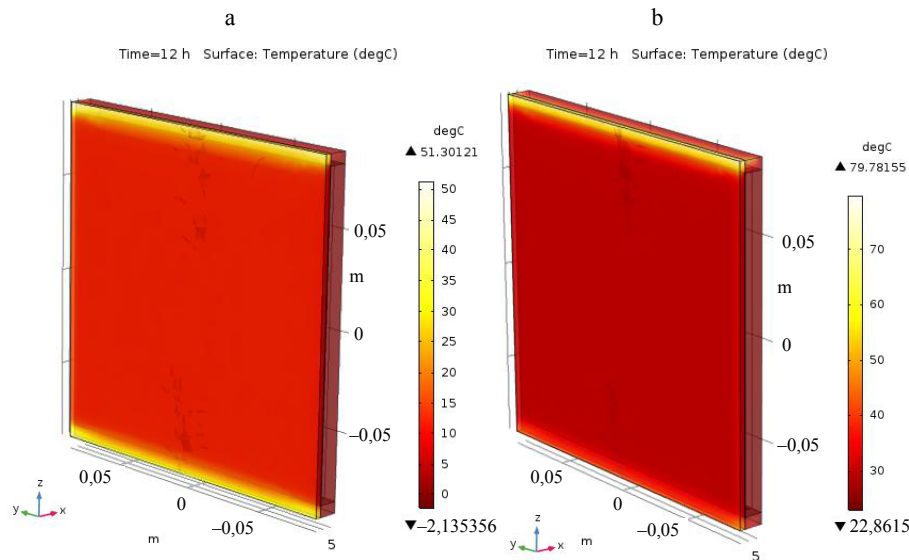


Рис. 3. Распределение максимальных значений температуры поверхности солнечной батареи при воздействии на ее поверхность солнечного излучения ($P_{\max} = 10 \text{ кВт/м}^2$) в полдень: а – 15 января; б – 15 июля

Fig. 3. Distribution of the maximum values of the surface temperature of the solar battery under exposure to the solar radiation ($P_{\max} = 10 \text{ kW/m}^2$) on its surface at noon on 15th January (a) and at noon on 15th July (b)

Как видно из рис. 4, начиная с восхода солнца и до 11:00 максимальная температура солнечной батареи повышается. Поскольку температура окружающей среды и продолжительность светового дня в январе меньше, чем в июле, возрастание температуры батареи в январе происходит более резко, чем в июле. С 11:00 до 16:00 существенных изменений максимальной температуры солнечной батареи как в январе, так и июле не наблюдается, что обусловлено постепенным нагревом всех ее элементов к 11:00 и эффективной радиационной теплопередачей между ними. Начиная с 16:00 понижается температура окружающей среды и, как следствие, максимальная температура солнечной батареи. Продолжительность светового дня и значения температуры окружающей среды также влияют на скорость понижения максимальной температуры. Чем они больше, тем более плавным будет уменьшение температуры солнечной батареи с течением времени. При повышении мощности концентрированного солнечного излучения и прочих равных условиях увеличение (с восхода солнца и до 11:00) и уменьшение (с 16:00 и до захода солнца) максимальной температуры солнечной батареи становится более существенным. Более того, возрастают изменения максимальной температуры, например при $P_{\max} = 3 \text{ кВт/м}^2$ (кривая 3, рис. 4) максимальная температура не превы-

шает +41 °С в промежутке времени с 11:00 до 16:00. Однако существенного возрастания температуры батареи в этот промежуток времени не происходит за счет стабилизации температуры тыльной стороны радиатора на уровне температуры окружающей среды.

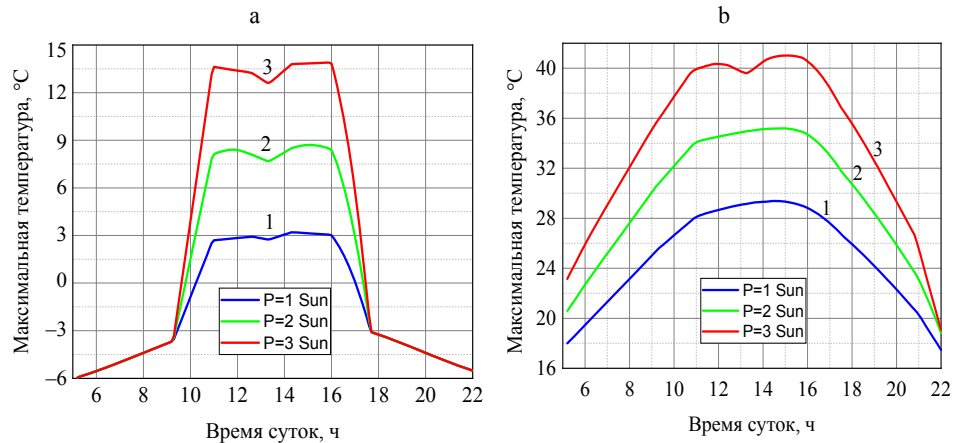


Рис. 4. Зависимости максимальных значений температуры солнечной батареи от времени суток при $P_{\max} = 1$ кВт/м² (кривая 1), 2 кВт/м² (кривая 2) и 3 кВт/м² (кривая 3): а – в середине января; б – в середине июля

Fig. 4. Dependencies of the maximum temperature values of the solar battery on the time of day in the middle of: а – January; б – July at $P_{\max} = 1$ kW/m² (curve 1), 2 kW/m² (curve 2) and 3 kW/m² (curve 3)

Зависимость теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток приведена на рис. 5. В реальных условиях между телами всегда происходит теплообмен. Количество отдаваемой и принимаемой теплоты определяется разностью между излучаемой и поглощаемой энергией. Как показали расчеты, тепловой поток с поверхности солнечной батареи в середине января достигает максимальных значений: ~2,18 и ~2,47 кВт/м² в 11:00 и 16:00 соответственно (при $P_{\max} = 3$ кВт/м², кривая 3, рис. 5а). А в середине июля его максимальные значения также достигаются дважды: около 7:30 (~3,61 кВт/м²) и около 19:00 (~3,66 кВт/м²) (при $P_{\max} = 3$ кВт/м², кривая 3, рис. 5б). При этом показано, что в дневные часы (с 11:00 до 16:00) тепловой поток ниже (кривые 1, 1', 2 и 2', рис. 5). Это обусловлено тем, что к середине дня как января, так и июля месяца температура всех элементов батареи выравнивается, а градиент температуры становится меньше.

На рис. 6 показаны изменения максимальных значений градиента температуры внутри термоэлектрического преобразователя солнечной батареи в течение суток в условиях облучения ее поверхности солнечным излучением, максимальное значение плотности мощности которого составляет 1, 2 и 3 кВт/м² в январе (кривые 1', 2' и 3') и июле (кривые 1, 2 и 3). Из полученных результатов следует, что градиент температуры достигает максимума около 13:00 как в середине января, так и в середине июля. В январе максимальные значения градиента температуры на ~50 % выше, чем в июле (рис. 6), вследствие большей разности температур на

поверхностях термоэлектрических преобразователей солнечной батареи в условиях более низких значений температуры окружающей среды.

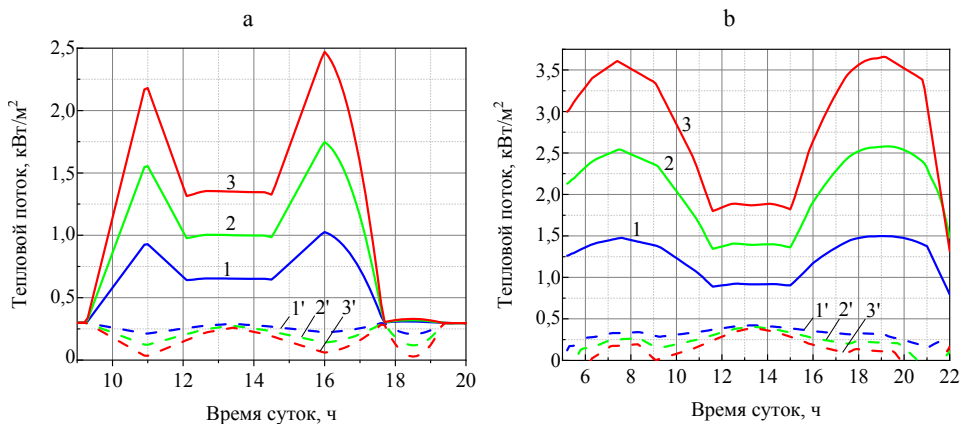


Рис. 5. Зависимости минимальных (кривые 1', 2' и 3') и максимальных (кривые 1, 2 и 3) значений теплового потока с поверхности солнечной батареи от времени суток при $P_{\max} = 1$ кВт/м² (кривые 1' и 1), 2 кВт/м² (кривые 2' и 2) и 3 кВт/м² (кривые 3' и 3): а – в середине января; б – в середине июля

Fig. 5. Dependencies of the minimum (curves 1', 2' and 3') and maximum (curves 1, 2 and 3) values of the heat flux from the surface of the solar battery on the time of day in the middle of: а – January; б – July at $P_{\max} = 1$ (curves 1' and 1), 2 (curves 2' and 2) and 3 (curves 3' and 3) kW/m²

При воздействии солнечного излучения на солнечную батарею градиенты температуры (рис. 6, 7) между внутренними и внешними поверхностями ее термоэлектрических преобразователей достигают максимальных значений с 11:00 до 16:00, вследствие чего генерируемая разность потенциалов между электродами 5 и 7 как в январе, так и в июле также достигает максимальных значений, увеличивая КПД работы устройства в целом.

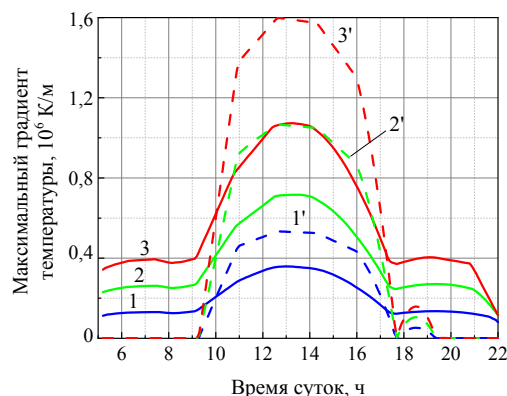


Рис. 6. Зависимости максимальных значений градиента температуры внутри солнечной батареи от времени суток при $P_{\max} = 1$ кВт/м² (кривые 1' и 1), 2 кВт/м² (кривые 2' и 2) и 3 кВт/м² (кривые 3' и 3) в серединах января (кривые 1', 2' и 3') и июля (кривые 1, 2 и 3)

Fig. 6. Dependencies of the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery on the time of day in the middle of January (curves 1', 2' and 3') and July (curves 1, 2 and 3) at $P_{\max} = 1$ (curves 1' and 1), 2 (curves 2' and 2) and 3 (curves 3' and 3) kW/m²

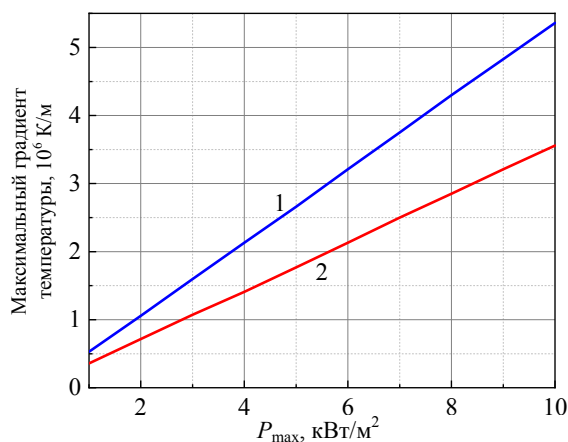


Рис. 7. Зависимости максимальных значений градиента температуры внутри солнечной батареи от максимальных значений плотности мощности солнечного излучения в серединах января (кривая 1) и июля (кривая 2)

Fig. 7. Dependencies of the maximum values of the temperature gradient inside the solar battery on the maximum values of solar radiation power density in the middle of January (curve 1) and July (curve 2)

Для фотоэлектрического преобразователя на основе CuInSe_2 [9] при интенсивности освещения $I_{\text{осв}}$ в 1 солнце 100 мВт/см^2 КПД = 20 %. При $I_{\text{осв}} = 174 \text{ мВт/см}^2$ КПД его достигает максимального значения 22 %, а при $I_{\text{осв}} = 700 \text{ мВт/см}^2$ КПД снижается до 18 %. В то же время при освещении, например, в 7 солнц (700 мВт/см^2) в январе (рис. 7) градиент температуры внутри термоэлектрического слоя на основе CuInSe_2 достигает значения $3,7 \times 10^6 \text{ К/м}$, что соответствует термоЭДС, равной 29,6 мВ [10]. Это означает, что КПД солнечной батареи при указанной интенсивности освещения равен 23,3 % и при этом происходит полная компенсация нелинейных свойств фотоэлектрического преобразователя при его нагреве, так как КПД солнечной батареи при $I_{\text{осв}} = 174 \text{ мВт/см}^2$ будет равен 23,4 %. Расчетная толщина термоэлектрического слоя составила в данном случае 10 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Трехмерная имитационная модель предложенной вертикальной тонкопленочной солнечной батареи, разработанная в программной среде COMSOL Multiphysics, позволила рассчитать и оценить основные температурные характеристики и диапазон КПД в условиях суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды, а также плотности мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальные значения которых варьировались от 1 до 10 кВт/м^2 .

2. Выполненные расчеты показали, что зимой при плотности мощности солнечного излучения с максимальным значением 7 кВт/м^2 можно получить полную компенсацию снижения КПД фотоэлектрического преобразо-

вателя на основе CuInSe_2 из-за его нагревания в середине дня. Точно также происходит компенсация и летом – с увеличением среднего значения КПД солнечной батареи на 2–3 % за счет генерации термоэлектричества. При использовании объемных термоэлектрических слоев, можно получить больший рост КПД солнечной батареи, но в этом случае толщина ее существенно увеличится, что приведет к росту ее стоимости.

3. Установлено, что использование вертикальных тонкопленочных солнечных батарей позволит повысить эффективность выработки электроэнергии за счет увеличения времени генерации электричества и снижения загрязненности их поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reker, S. Investigation of Vertical Solar Power Plants Into a Future German Energy System / S. Reker, J. Schneider, C. Gerhards // *Smart Energy*. 2022. Vol. 7. P. 100083-1–100083-12. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
2. Radiative Cooling for Vertical Solar Panels / H. Fang [et al.] // *Science*. 2024. Vol. 27, Iss. 2. P. 108806-1–14. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108806>.
3. Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А. К. Есман [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410>.
4. Солнечная батарея: пат. на пол. модель 7713 Респ. Беларусь: МПК F 24J 2/06, H 02N 6/00 / А. К. Есман, В. К. Кулешов, М. В. Шпектор. Оpubл. 30.10.2011.
5. Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software [Electronic Resource] // COMSOL, Inc. USA. Mode of access: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>. Date of access: 21.04.2024.
6. Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe_2 / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
7. Есман, А. К. Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>.
8. Thermo-Photo-Voltaic Cell [Electronic Resource] // COMSOL, Inc. USA. Mode of access: <https://www.comsol.com/model/thermo-photo-voltaic-cell-494>. Date of access: 21.04.2024.
9. Временная стабильность характеристик солнечных элементов на основе соединения CuInGaSe_2 в процессе работы / Е. В. Луценко [и др.] // *Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX Междунар. науч. конф. (Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г.): в 2 ч. / редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.) [и др.]*. Гродно: ГрГУ, 2012. Ч. 2. С. 23–26.
10. Термоэлектрические свойства твердых растворов $(\text{CuInSe}_2)_{1-x}(\text{In}_2\text{Te}_3)_x$ / Ч. И. Абилов [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56, вып. 1. С. 38–41. <https://doi.org/10.21883/FTP.2022.01.51809.25>.

Поступила 11.03.2024 Подписана в печать 21.05.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

REFERENCES

1. Reker S., Schneider J., Gerhards C. (2022) Investigation of Vertical Solar Power Plants into a Future German Energy System. *Smart Energy*. 7, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
2. Fang H., Zhou L., Dang S., St. De Wolf, Q. Gan. (2024) Radiative Cooling for Vertical Solar Panels. *Science*, 27 (2), 108806. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108806>.
3. Esman, A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2023) Study of Vertically Oriented Solar Battery by Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Nauka i Tekhnika* =

- Science and Technique*, 22 (5), 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410> (in Russian).
4. Esman A. K., Kuleshov V. K., Shpektor M. V. (2011) *Solar Battery*. Patent of the Republic of Belarus No 7713 (in Russian).
 5. Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software. *COMSOL*. Available at: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (accessed: 21 April 2024).
 6. Esman A. K., Zыков G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe₂ Chalcopyrite Structure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13> (in Russian).
 7. Esman A. K., Zыков G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2021) Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258> (in Russian).
 8. Thermo-Photo-Voltaic Cell. *COMSOL*. Available at: <https://www.comsol.com/model/thermo-photo-voltaic-cell-494> (accessed: 21 April 2024).
 9. Lutsenko E. V., Rzheutsky N. V., Voinilovich A. G., Danilchik A. V., Svitenkov I. E., Pavlovsky V. N., Yablonsky G. P., Shiripov V. Ya., Nastochkin S. M., Khokhlov E. A. (2012) Temporal Stability of the Characteristics of Solar Cells Based on the CuInGaSe₂ Compound during Operation. *Lazernaya fizika i opticheskiye tekhnologii: materialy IX mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Laser physics and optical technologies: materials of the IX international scientific conference (Grodno, May 30 – June 2, 2012. Part 2)]. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 23–26 (in Russian).
 10. Abilov Ch. I., Hasanova M. Sh., Huseynova N. T., Kasumova E.K. (2022) Thermoelectric Properties of (CuInSe₂)_{1-x}(In₂Te₃)_x Solid Solutions. *Semiconductors*, 56 (1), 31–34. <https://doi.org/10.21883/SC.2022.01.53014.25>.

Received: 11 March 2024

Accepted: 21 May 2024

Published online: 30 September 2024