



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

PROTOELECTRIC CELL

Статья поступила в редакцию 15.10.20 Ред. Рег. №11-03

The article has entered in publishing office 15.10.20 Ed. Reg. No. 11-03

УДК 620.92

**СОЛНЕЧНЫЕ ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДУЛИ
СТАЦИОНАРНОЙ И МОБИЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

В.А. Панченко

Российский университет транспорта МИИТ, ул. Образцова, д. 9, Москва, Россия, 127994,
тел.:+7(495)681-13-40, tu@miit.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Вешняковский проезд, 5,
Москва, Россия, 109428, +7(499)171-43-49, vim@vim.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.11.002

Заключение совета рецензентов:27.10.20

Заключение совета экспертов: 27.10.20

Принято к публикации:29.10.20

В статье рассмотрены оригинальные конструкции солнечных теплофотоэлектрических модулей планарной и концентраторной конструкции, предназначенные для стационарной и мобильной энергогенерации. Рассмотрено моделирование разработанных модулей в системе конечно-элементного анализа, а также представлены результаты исследований планарной теплофотоэлектрической кровельной панели и концентраторных теплофотоэлектрических модулей с параболическим и складным параболическим концентратором. В качестве термодинамического преобразователя солнечной энергии предложен двигатель Стирлинга в составе теплофотоэлектрической концентраторной установки, результаты испытаний которой также представлены в статье. Разработанные теплофотоэлектрические модули планарной и концентраторной конструкции позволяют производить автономное или параллельное с существующей энергосетью энергоснабжение потребителей. Использование в конструкциях теплофотоэлектрических модулей параболических концентраторов, высоковольтных матричных фотоэлектрических преобразователей, а также двухкомпонентного полисилоксанового компаунда увеличивает общую эффективность солнечных модулей и срок их службы. Наряду с выработкой электрической и тепловой энергии кровельные панели также обеспечивают строительную и защитную функцию зданий, а использование в их основе вторичного пластика позволяет решить проблемы с его вторичным использованием и удешевляет производство. Значительный потенциал имеют теплофотоэлектрические концентраторные солнечные модули с двигателями Стирлинга, электрическая эффективность которых может быть больше электрической эффективности фотоэлектрических преобразователей, а срок службы не менее срока службы фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: концентратор солнечного излучения, кровельная панель, матричные фотоэлектрические преобразователи, теплофотоэлектрический модуль, двигатель Стирлинга, система конечно-элементного анализа, энергоснабжение.

**SOLAR PHOTOVOLTAIC THERMAL MODULES OF STATIONARY AND
MOBILE CONSTRUCTION**

V.A. Panchenko

Russian University of Transport MSUR, Obraztsova Street, 9, Moscow, Russia, 127994,
tel.:+7(495)681-13-40, tu@miit.ru
Federal Scientific Agroengineering Center All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization,



The article discusses the original designs of solar photovoltaic thermal modules of planar and concentrator design, intended for stationary and mobile power generation. The modeling of the developed modules in the system of finite element analysis is considered, as well as the results of studies of a planar photovoltaic thermal roofing panel and concentrator photovoltaic thermal modules with paraboloid and folding parabolic-cylindrical concentrators. As a thermodynamic converter of solar energy, the Stirling engine is proposed as a part of the photovoltaic thermal concentrator installation, the test results of which are also presented in the article. The developed thermo-photoelectric modules of the planar and concentrator design make it possible to produce autonomous or parallel power supply to consumers. The use of parabolic concentrators, high-voltage matrix photovoltaic converters, as well as a two-component poly-siloxane compound in the designs of thermal photovoltaic modules increases the overall efficiency of solar modules and their service life. In addition to generating electrical and thermal energy, roofing panels also provide the construction and protective function of buildings, and the use of recycled plastic in their basis allows solving problems with its secondary use and reduces the cost of production. Thermal photovoltaic concentrator solar modules with Stirling motors have a significant potential, the electrical efficiency of which can be higher than the electrical efficiency of photovoltaic converters, and the service life would not be less than the service life of photovoltaic converters.

Key words: solar radiation concentrator, roofing panel, matrix photoelectric converters, photovoltaic thermal module, Stirling engine, finite element analysis system, power supply.



Panchenko Vladimir Anatolevich
Панченко Владимир Анатольевич

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Российского университета транспорта (МИИТ), старший научный сотрудник лаборатории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

Образование: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.

Область научных интересов: возобновляемая энергетика, трёхмерное моделирование, электротранспорт, циклическая экономика и устойчивое развитие.

Публикации: автор более 200 научно-методических работ, в том числе 3 монографий, 6 учебных изданий, 7 глав иностранных книг, 15 патентов, в том числе международного.

ResearcherID: P-8127-2017

Scopus Author ID: 57201922860

Web of Science ResearcherID:

AAE-1758-2019

РИНЦ AuthorID: 661512

(Индекс Хирша: H = 17)

SPIN-код: 1626-6983

Information about the author: PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Russian University of Transport (MIIT), Senior Researcher of the Laboratory of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Education: Bauman Moscow State Technical University

Research area: renewable energy, 3D modeling, electric transport, cyclical economy and sustainable development.

Publications: author of over 200 scientific and methodological works, including 3 monographs, 6 educational publications, 7 chapters of foreign books, 15 patents, including international.

ResearcherID: P-8127-2017

Scopus Author ID: 57201922860

Web of Science ResearcherID:

AAE-1758-2019

RSCI AuthorID: 661512

(Hirsch index: H = 17)

SPIN-code: 1626-6983

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 – 5]. В большей степени получили развитие электростанции на основе преобразователей ветровой энергии и солнечной энергии, причём солнечные энергостанции в последние годы имеют более активное развитие по сравнению с другими стан-

циями на основе возобновляемой энергии [6,7]. Основным способом преобразования солнечного излучения в электрическую энергию является прямое преобразование, реализуемое с помощью планарных и матричных фотоэлектрических преобразователей [8 – 10]. Основной особенностью матричных кремниевых фотоэлектрических преобразователей, которые были разработаны во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства, является увеличение их электрической эффективности при совместной работе с концентраторами солнечного

излучения [9, 10]. На основе таких фотоэлектрических преобразователей целесообразно создание теплофотоэлектрических модулей с возможностью одновременной генерации как электрической, так и тепловой энергии. В таких установках первоочередной задачей является отвод тепла от фотоэлектрических преобразователей, где конструкция самих солнечных модулей может быть как планарной [11, 12], так и концентраторной [13 – 15], причём использование концентраторов солнечного излучения позволяет увеличить плотность солнечного излучения на фотоприёмнике, уменьшить количество фотоэлектрических преобразователей и увеличить их электрическую эффективность.

Наряду с максимальной эффективностью теплофотоэлектрических модулей важной задачей является увеличение срока службы фотоэлектрических преобразователей и, соответственно, времени работы солнечного модуля на уровне номинальной электрической мощности. В результате исследований, выполненных во Всероссийском научно-

исследовательском институте электрификации сельского хозяйства совместно с "Poulek Solar L.t.d." (Чехия), разработан герметизирующий компонент в виде двухкомпонентного полисилоксанового компаунда, позволяющий фотоэлектрическим преобразователям работать совместно с концентраторами солнечного излучения с увеличенной эффективностью и без деградационных процессов [16, 17]. Также, благодаря разработанной технологии изготовления солнечных модулей, в их конструкции отсутствуют внутренние механические напряжения, образуется высокая устойчивость к температурной, ультрафиолетовой и озонной деградации, причём сама технология изготовления экологически безопасна.

Таким образом, поиск оптимальной конструкции подобного рода модулей, которая будет обеспечивать максимальную общую эффективность модуля и увеличенный срок службы, является актуальной и важной задачей современных исследований.



Список обозначений	
Единицы измерения	
%	Процент
°С	Градус Цельсия
А	Ампер
В	Вольт
Вт	Ватт
Вт/см ²	Ватт, поделённый на квадратный сантиметр
кг	Килограмм
л	Литр
л/мин	Литр в минуту
м	Метр
м ²	Метр квадратный
мА	Миллиампер
мин	Минута
мм	Миллиметр

шт	Штук
Аббревиатуры	
УДС	Учебный двигатель Стирлинга

1. Планарная кровельная теплофотоэлектрическая панель

С целью обеспечения строительно-защитных функций здания с одновременной выработкой электрической и тепловой энергии разработана солнечная кровельная панель, основа которой изготавливается из вторичного пластика, что положительно сказывается на экологии, а фотоэлектрические преобразователи загерметизированы с помощью двухкомпонентного полисилоксанового компаунда, который увеличивает срок их номинальной мощности [16, 17] (рисунок 1).



Рис. 1. Планарная теплофотоэлектрическая кровельная панель
Fig. 1. Planar photovoltaic thermal roofing panel



Для определения теплового состояния радиатора теплофотоэлектрической кровельной панели, к которому крепятся фотоэлектрические преобразователи, а также линий течения и температуры теплоносителя, разработана методика моделирования послойного теплового состояния компонентов модуля в системе конечно-элементного анализа Ansys [18], результаты которого представлены на рисунке 2 слева и посередине. Разработанная методика позволяет анализиро-

вать тепловые режимы, движение теплоносителя и конструкцию модуля, в результате чего можно оптимизировать послойную структуру компонентов кровельной панели, исходя из требований к выходной электрической и тепловой мощности солнечного модуля. Вольтамперная характеристика планарной теплофотоэлектрической кровельной панели, полученная в результате лабораторных испытаний, представлена на рисунке 2 справа.

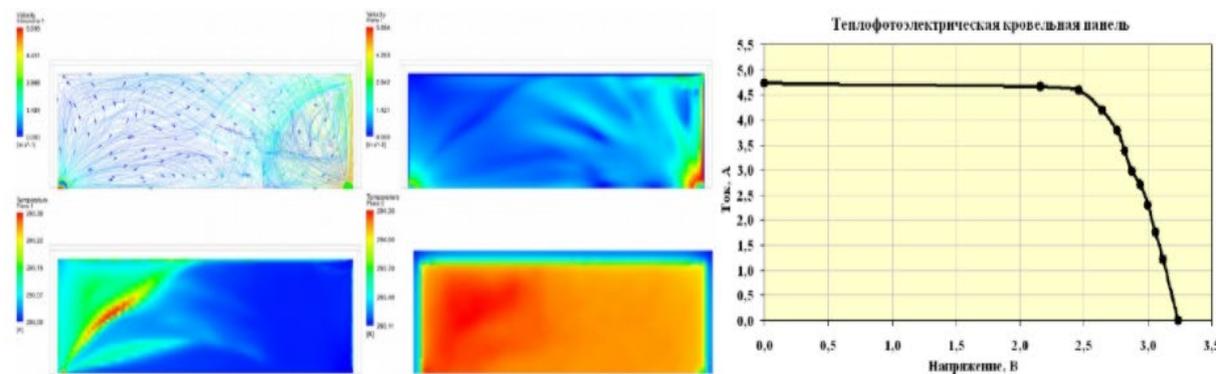


Рис. 2. Линии течения, скорость и температуры теплоносителя и радиатора (слева и посередине) и вольтамперная характеристика планарной теплофотоэлектрической кровельной панели (справа)

Fig. 2. Flow lines, velocity and temperatures of the coolant and radiator (on the left and in the middle) and current-voltage characteristic of the photovoltaic thermal roofing panel (on the right)

Наряду с определением вольтамперной характеристики планарной теплофотоэлектрической кровельной

панели были определены также её основные параметры, которые представлены в таблице 1.

Основные параметры планарной теплофотоэлектрической кровельной панели

Таблица 1

The main parameters of the planar photovoltaic thermal roofing panel

Table 1

Параметр, единица измерения	Показатель
Размеры кровельной панели (длина × ширина × толщина), мм	434 × 312 × 26
Масса кровельной панели, кг	2,5
Срок номинальной мощности фотоэлектрических преобразователей, лет	40 – 50
Тип, коммутация и количество фотоэлектрических преобразователей, шт.	Монокристаллические кремниевые, последовательная, 6
Размеры (длина × ширина), (мм) и площадь фотоэлектрических преобразователей, м ²	125 × 125; 0,09
Материал абсорбера кровельной панели	Алюминий (медь)
Ток короткого замыкания и ток в рабочей точке, А	4,7 (6,2)*; 4,6 (5,8)*
Напряжение холостого хода и напряжение в рабочей точке, В	3,2 (4,1)*; 2,5 (3,4)*
Электрическая мощность кровельной панели, Вт	11 (20)*
Коэффициент заполнения вольтамперной характеристики и электрическая эффективность фотопреобразования, %	60 (75)*; 13 (20)*
Материал основы кровельной панели	Пластик (вторичный пластик)
Заполнитель-герметик фотоэлектрических преобразователей	Кремний органический двухкомпонентный полисилоксановый компаунд
Температура эксплуатации кровельной панели, °С	- 50 ... + 90
Теплоноситель кровельной панели и его объём в радиаторе кровельной панели, л	Вода (воздух, фреон); 0,3
Расход теплоносителя, (л/мин) и его температура на входе и выходе, °С	... 0,1 – 1 ... (регулируемый); 10 – 30; 35 – 55



В скобках (*) указаны электрические значения при использовании фотоэлектрических преобразователей с односторонней токосъёмной сеткой и электрическим коэффициентом полезного действия около 20%, которые планируются использовать в серийном производстве планарных теплофотоэлектрических кровельных панелей.

2. Концентраторная кровельная теплофотоэлектрическая панель

Использование концентраторов солнечного излучения в кровельной панели позволит снизить количе-

ство используемых фотоэлектрических преобразователей и уменьшить стоимость солнечного модуля. В таких кровельных панелях наряду с фотоэлектрическими преобразователями в виде полосы, загерметизированными с двухкомпонентным компаундом, используется также линейно-фокусирующий цилиндрический концентратор солнечного излучения (рисунок 3). Защитное покрытие таких кровельных панелей может быть выполнено в виде оптической отклоняющей системы, увеличивающей время работы панелей в течение светового дня [19].

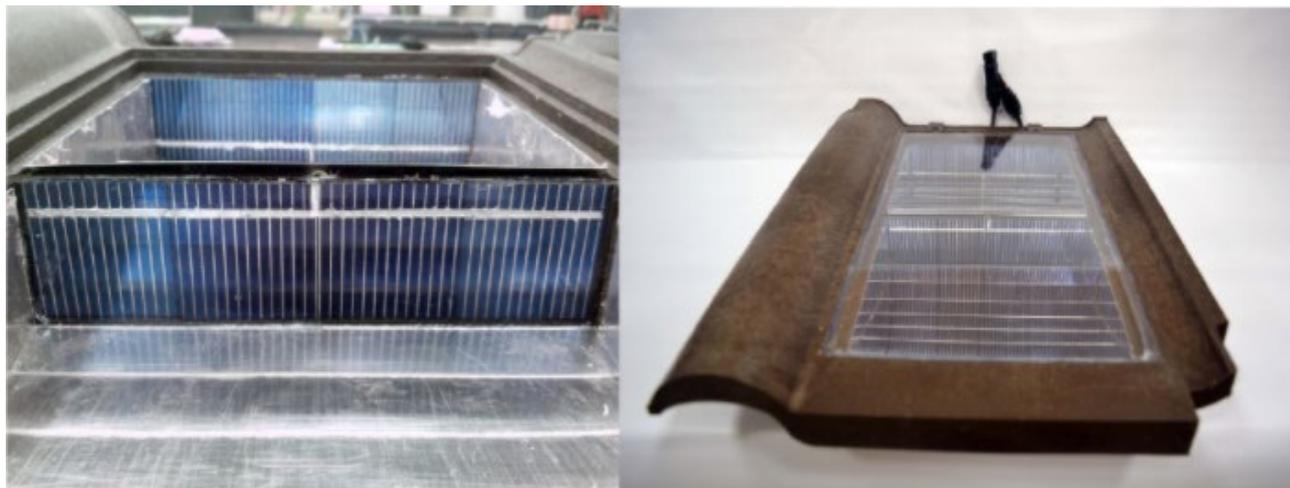


Рис. 3. Концентраторная солнечная кровельная панель
Fig. 3. Concentrator solar roofing panel

В концентраторной кровельной панели используются 4 фотоэлектрических преобразователя с размерами 40 × 40 мм каждый, соединённые параллельно, а общие размеры фотоприёмника составляют 40 × 160 мм. Теоретическая концентрация солнечного излуче-

ния при таких размерах фотоприёмника составляет около 4 крат. Вольтамперная характеристика при натуральных испытаниях фотоэлектрического преобразователя и фотоприёмника концентраторной кровельной панели в сборе представлены на рисунке 4.

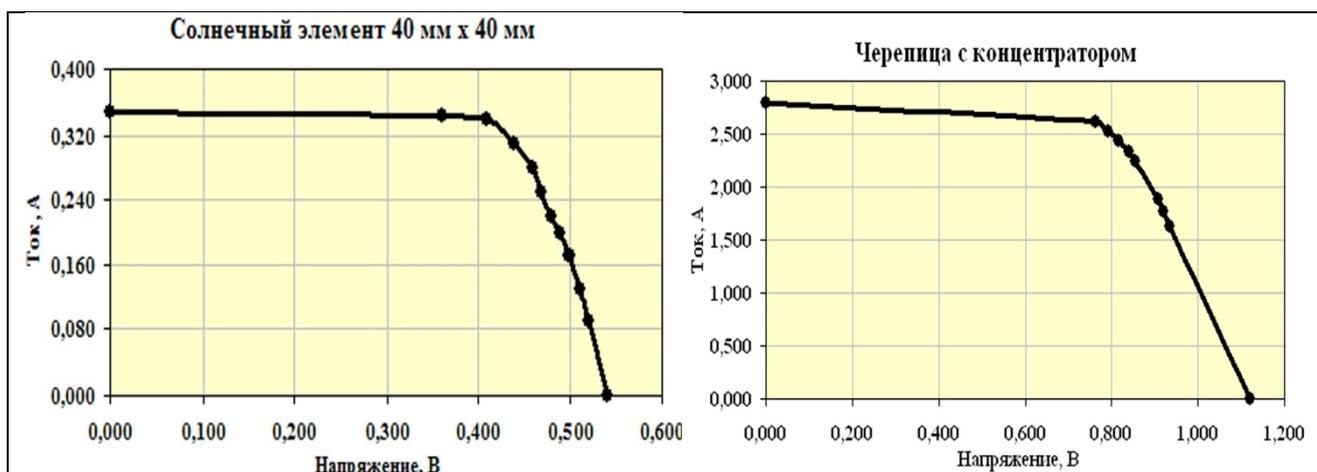


Рис. 4. Вольтамперная характеристика фотоэлектрического преобразователя (слева) и концентраторной кровельной панели (справа)
Fig. 4. Current-voltage characteristic of the photovoltaic converter (on the left) and the concentrator roofing panel (on the right)

Основные параметры концентраторной кровельной панели представлены в таблице 2

Таблица 2

Параметры концентраторной кровельной панели

Table 2

Parameters of the concentrator roofing panel

Показатель, единица измерения	Величина
Напряжение холостого хода и рабочее напряжение, В	1,12; 0,8
Ток короткого замыкания и рабочий ток, А	2,8; 2,53
Электрическая мощность, (Вт) и коэффициент заполнения вольтамперной характеристики	2; 0,64
Величина концентрации солнечного излучения на фотоприёмнике, крат	4 (теоретическая) / 2 (практическая)
Размеры кровельной панели (длина × ширина × толщина), мм	420 × 310 × 80
Срок номинальной мощности фотоэлектрических преобразователей кровельной панели, лет	40 – 50
Масса кровельной панели, кг	3,5



С целью увеличения выходной мощности единичной кровельной панели и возможности использования целых фотоэлектрических преобразователей с размерами 125 × 125 мм, а также получения горячей воды

на выходе кровельной панели разработана концентраторная теплофотоэлектрическая кровельная панель с увеличенными габаритами [20] (рисунок 5).

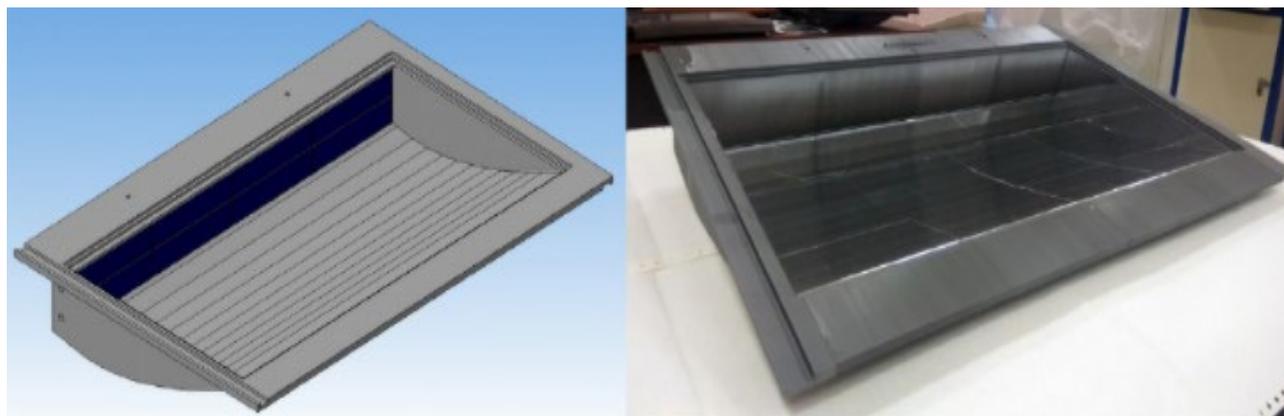


Рис. 5. Модель концентраторной теплофотоэлектрической кровельной панели (слева) и её основа, изготовленная с помощью трёхмерной послойной печати (справа)

Fig. 5. Model of the concentrator photovoltaic thermal roofing panel (on the left) and its base, made using 3D layer-by-layer printing (on the right)

Разработанная концентраторная теплофотоэлектрическая кровельная панель с увеличенными габаритами наряду со строительно-защитными функциями и выработкой электроэнергии позволяет получать горячую воду на выходе [21]. Технология герметизации фотоэлектрических преобразователей увеличивает срок их номинальной мощности и позволяет работать без деградации в концентрированном солнечном потоке. Использование в качестве материала основы панели вторичного пластика положительно влияет на окружающую среду и уменьшает стоимость самой кровельной панели. Использование концентраторов солнечного излучения также уменьшает стоимость

панели благодаря использованию меньшего количества фотоэлектрических преобразователей, а оптическая отклоняющая система увеличивает время работы панели в течение светового дня.

3. Теплофотоэлектрический модуль с концентратором параболического типа и матричными фотоэлектрическими преобразователями

С целью автономного и параллельного с существующей энергетической сетью энергоснабжения [22] разработан стационарный концентраторный теп-



лофотоэлектрический модуль [23], профиль концентратора которого обеспечивает равномерную освещённость в фокальной области фотоприёмника, в состав которого входят матричные высоковольтные кремниевые фотоэлектрические преобразователи [9,10], загерметизированные с помощью двухкомпонентного полисилоксанового компаунда [16,17]. Солнечный теплофотоэлектрический модуль (рисунок 6 слева) состоит из концентратора солнечного излуче-

ния параболического типа 1, обеспечивающего увеличение плотности солнечного излучения на поверхности фотоприёмника 2, который состоит из цилиндрического фотоэлектрического приёмника 3 и теплового фотоприёмника 4. Фотоэлектрический приёмник охлаждается с помощью алюминиевого радиатора водяного охлаждения, вход теплоносителя которого обеспечивается в нижней части радиатора (рисунок 6 справа).

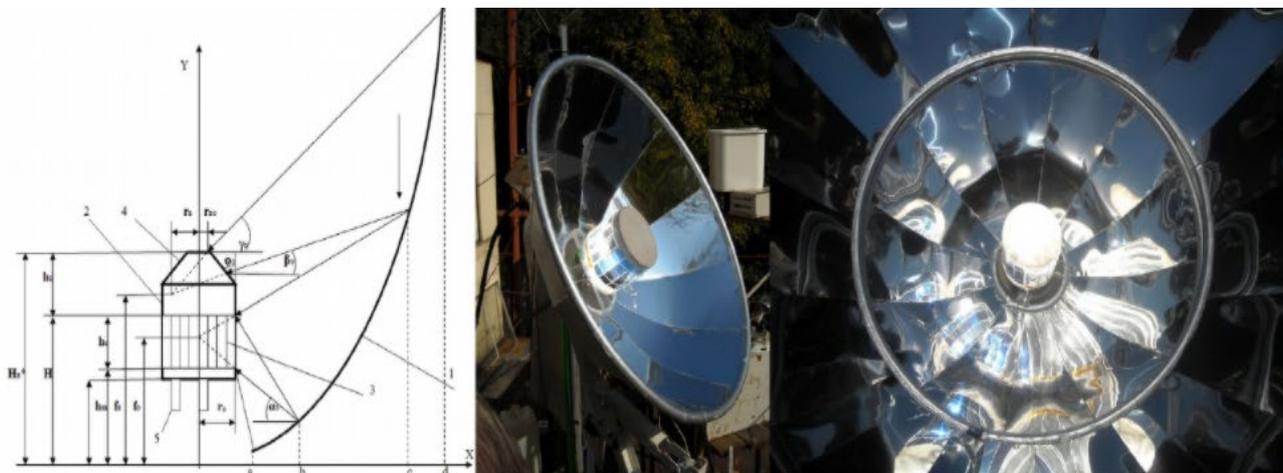


Рис. 6. Схема теплофотоэлектрического солнечного модуля с концентратором параболического типа (слева) и изготовленный модуль (посередине и справа)
Fig. 6. Scheme of the photovoltaic thermal solar module with a paraboloid-type concentrator (on the left) and a manufactured module (in the middle and on the right)

Для определения теплового состояния радиатора теплофотоэлектрического модуля, а также линий течения и температуры теплоносителя разработана ме-

тодика экспресс-оценки теплового состояния в системе конечно-элементного анализа Ansys, результаты моделирования которой представлены на рисунке 7.

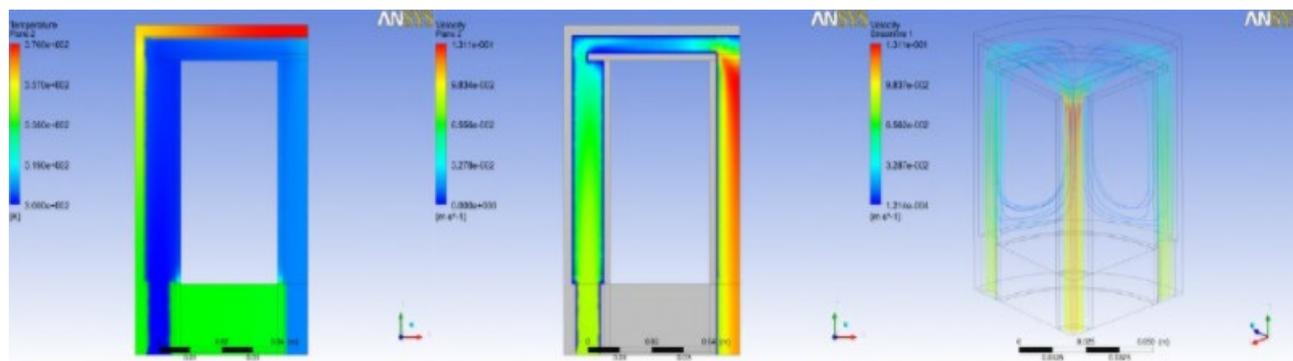


Рис. 7. Температура теплоносителя и радиатора (слева), скорость теплоносителя (посередине) и линии его течения (справа)
Fig. 7. Coolant and radiator temperature (on the left), coolant velocity (in the middle) and flow lines (on the right)

В результате проведения натурных испытаний теплофотоэлектрического модуля с концентратором параболического типа получены вольтамперные характеристики высоковольтных матричных фотоэлек-

трических преобразователей при различных условиях освещения и охлаждения (рисунок 8 сверху), а также тепловые характеристики работы теплофотоэлектрического модуля [24] (рисунок 8 снизу).

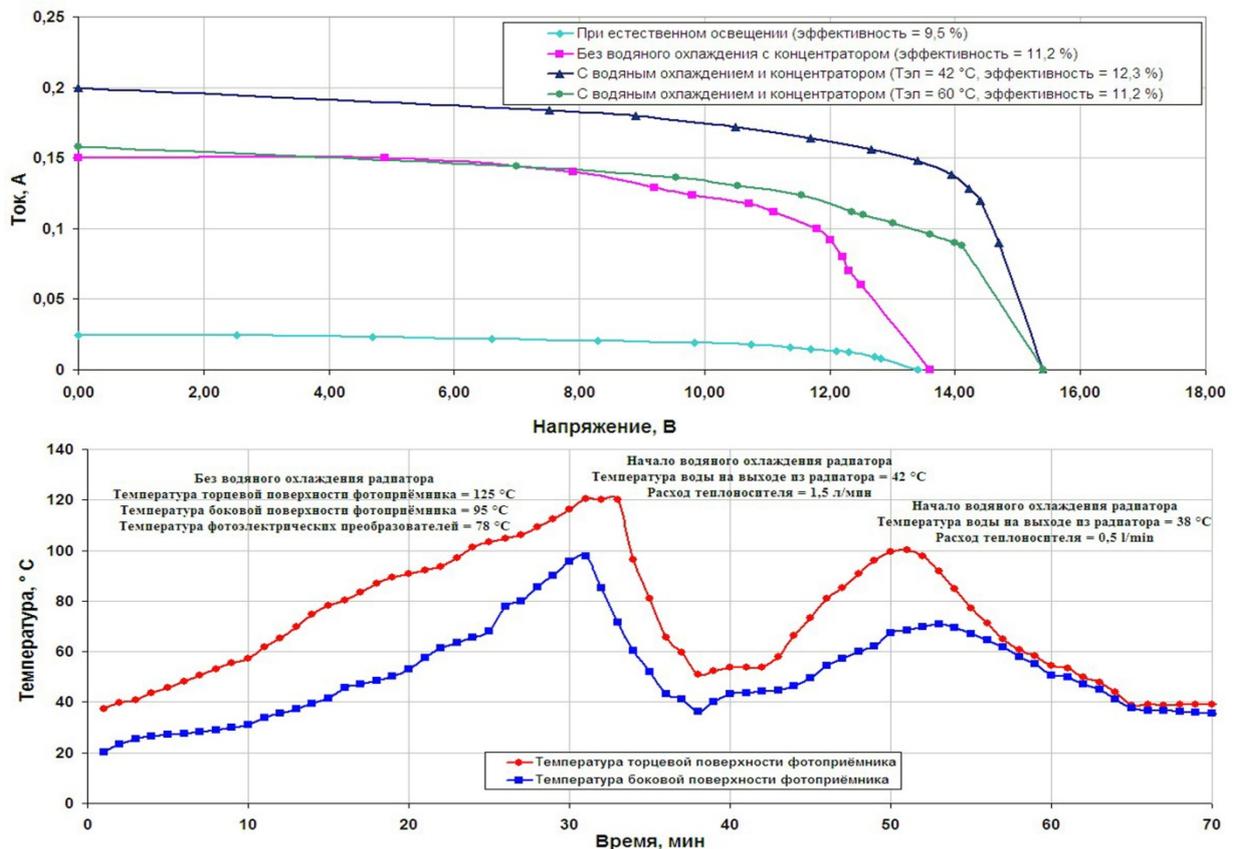


Рис. 8. Вольтамперные характеристики матричных фотоэлектрических преобразователей (сверху) и тепловые характеристики работы теплофотоэлектрического модуля (снизу)
Fig. 8. Current-voltage characteristics of matrix photoelectric converters (on the top) and thermal characteristics of the thermal photovoltaic module (below)

Основные параметры теплофотоэлектрического модуля с концентратором параболоидного типа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры теплофотоэлектрического модуля с концентратором параболоидного типа

Table 3

Parameters of the photovoltaic thermal module with a paraboloid concentrator

Показатель, единица измерения	Величина
Электрическая мощность, (Вт) и электрическая эффективность фотоэлектрических преобразователей при естественном освещении, %	18,5; 9,5
Напряжение холостого хода и рабочее напряжение, В	15,4; 12
Тип фотоэлектрических преобразователей и их площадь, м ²	Матричные высоковольтные; 0,0224
Средняя концентрация солнечного излучения на фотоэлектрической и тепловой частях фотоприёмника, крат	7,1; 23
Электрическая и тепловая эффективности солнечного модуля, %	12,3; 50
Оптическая эффективность концентратора солнечного излучения, %	65
Тип теплоносителя и величина его расхода, л/мин	Вода; 0,5
Температура теплоносителя на входе и на выходе из солнечного модуля, °С	20; 40
Площадь мишени концентратора для фотоэлектрической и тепловой частей фотоприёмника солнечного модуля, м ²	0,28; 0,5
Габаритные размеры солнечного модуля (длина × ширина × высота), м	1,05 × 1,05 × 0,54
Масса солнечного модуля, кг	2,5

Определение электрической эффективности матричных фотоэлектрических преобразователей, которые используются в концентраторном солнечном теплофотоэлектрическом модуле, проводилось при различных уровнях освещённости (5 – 25 Вт/см², что со-

ответствует 250-ти кратной концентрации солнечного излучения). Целью экспериментов было определение максимальной электрической эффективности матричных фотоэлектрических преобразователей и обоснование их использования в концентраторных солнеч-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ных установках. Максимальное значение электрической эффективности матричного фотоэлектрического преобразователя с площадью 3 см^2 получено при концентрации освещённости, эквивалентной 51 крат (28%; 233,7 мА ток короткого замыкания, 24,4 В напряжение холостого хода; 4,3 Вт электрическая мощность; 0,75 коэффициент заполнения вольтамперной характеристики).

Двусторонний матричный фотоэлектрический преобразователь с размерами $700 \times 100 \text{ мм}$ (рисунок 9 слева) имеет напряжение холостого хода 1059 В и рабочее напряжение 900 В [10]. Вольтамперная характеристика матричного фотоэлектрического преобразователя при естественной освещённости представлена на рисунке 9 справа.

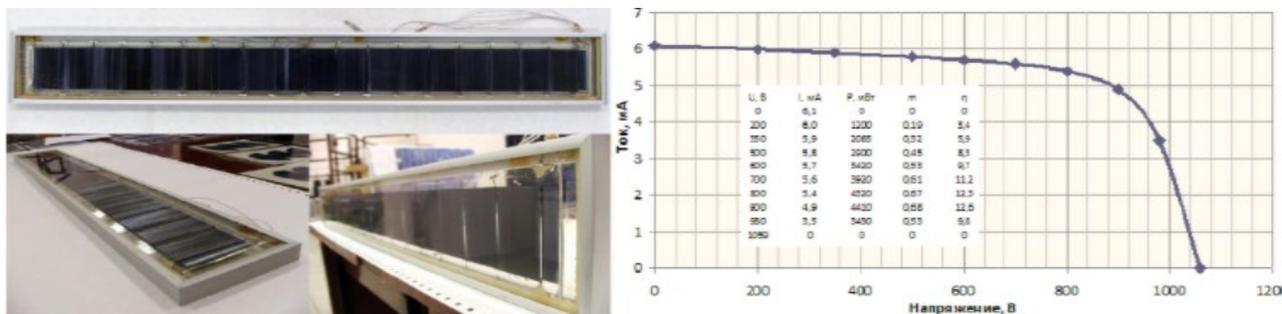


Рис. 9. Высоковольтный матричный фотоэлектрический преобразователь (слева) и его вольтамперная характеристика без концентрации солнечного излучения (справа)
Fig. 9. High-voltage matrix photovoltaic converter (on the left) and its current-voltage characteristic without concentration of solar radiation (on the right)

За счёт работы двух сторон матричного фотоэлектрического преобразователя электрическая мощность и эффективность модуля увеличивается. Использование при изготовлении матричных солнечных модулей двухкомпонентного компаунда увеличивает срок номинальной электрической мощности, электрическая эффективность матричных модулей больше, чем у планарных модулей, причём матричные фотоэлектрические преобразователи могут работать в концентраторных системах с высокой температурой поверхности ($60 \text{ }^\circ\text{C}$ и более), а используемая площадь преобразователей при одинаковой электрической мощности значительно меньше, чем при использовании планарных фотоэлектрических преобразователей. Для эффективного использования матричных фотоэлектрических преобразователей с концентраторами солнечного излучения необходимо обеспечить равномерную освещённость концентрированным солнечным излучением поверхности фотоэлектрических преобразователей и их достаточное охлаждение.

Подобного рода фотоэлектрические преобразователи целесообразно использовать и в теплофотоэлектрических модулях с линейным фотоприёмником и

складным параболическим концентратором солнечного излучения для возможной транспортировки и мобильно-автономной энергогенерации.

4. Мобильный теплофотоэлектрический модуль со складным параболическим концентратором

В удалённых от энергетических сетей регионах целесообразно использование мобильных и складных теплофотоэлектрических модулей для автономного энергоснабжения потребителей. С этой целью разработан теплофотоэлектрический складной модуль с параболическим концентратором, в состав фотоприёмника которого входят двусторонние фотоэлектрические преобразователи, загерметизированные с помощью двухкомпонентного полисилоксанового компаунда. В разработанном теплофотоэлектрическом модуле предусмотрено одновременное использование двух фотоприёмников с их одновременной засветкой или одного фотоприёмника с удвоенной величиной концентрации солнечного излучения (рисунок 10).

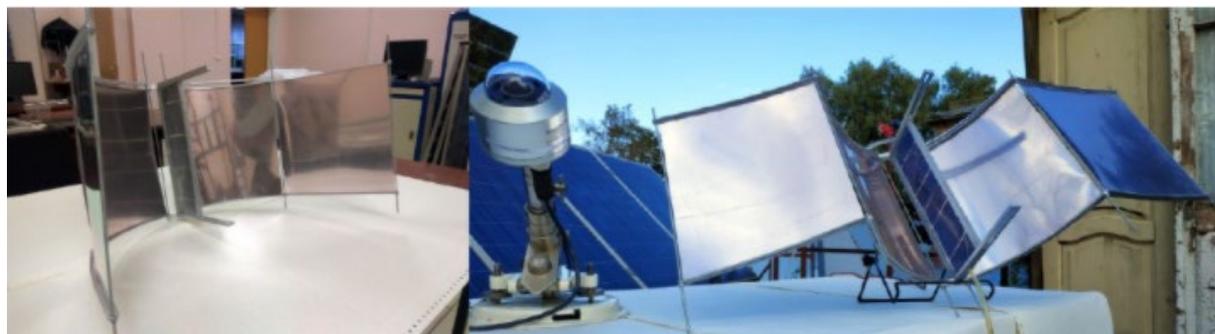


Рис. 10. Теплофотоэлектрический модуль со складным параболическим концентратором
Fig. 10. Photovoltaic thermal module with folding parabolic-cylindrical concentrator



В результате моделирования в системе конечно-элементного анализа Ansys получены распределения температур теплоносителя и фотоэлектрических преобразователей теплофотоэлектрического модуля, а

также скорости и линии течения теплоносителя (рисунок 11 слева). Вольтамперная характеристика одной стороны двустороннего фотоэлектрического приёмника представлена на рисунке 11 справа.

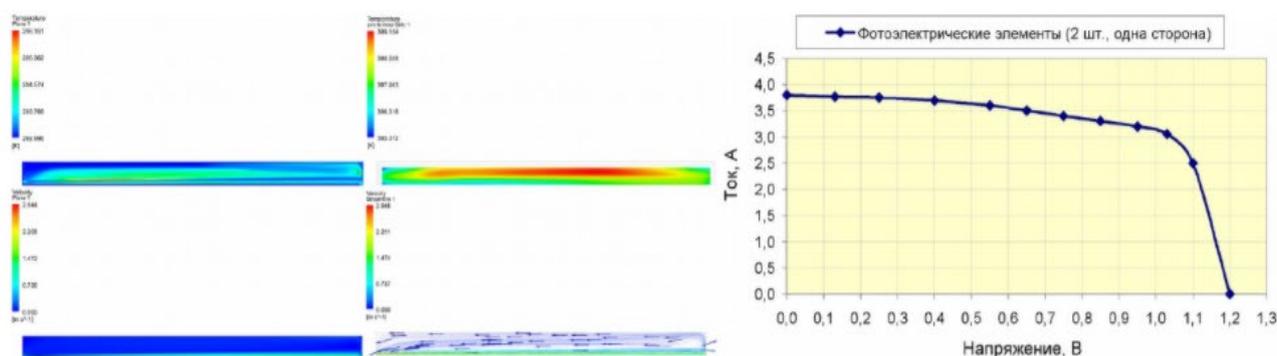


Рис. 11. Распределения температур теплоносителя и фотоэлектрических преобразователей, а также скорости и линии течения теплоносителя (слева) и вольтамперная характеристика одной стороны двустороннего фотоэлектрического приёмника (справа)

Fig. 11. Temperature distributions of the coolant and photovoltaic converters, as well as the velocity and flow lines of the coolant (on the left) and the current-voltage characteristic of the one side of the bilateral photovoltaic photodetector (right)

Основные параметры мобильного теплофотоэлектрического модуля со складным параболическим концентратором представлены в таблице 4.

Параметры мобильного теплофотоэлектрического модуля со складным параболическим концентратором

Таблица 4

Table 4

Parameters of the mobile photovoltaic thermal module with folding parabolic-cylindrical concentrator

Параметр, единица измерения	Величина
Тип фотоэлектрических преобразователей	Двусторонние кремниевые монокристаллические планарные(матричные высоковольтные)
Площадь фотоэлектрических преобразователей, м ²	0,018
Материал концентратора солнечного излучения	Светоотражающий лист Alanod толщиной 0,3 мм
Величина концентрации солнечного излучения на фотоприёмнике, (крат) и количество теплофотоэлектрических фотоприёмников в модуле, шт	3 / 6; 1 / 2
Количество независимых концентраторов солнечного излучения, шт	4
Заполнитель-герметик фотоэлектрических преобразователей	Кремнийорганический двухкомпонентный полисилоксановый компаунд
Теплоноситель	Вода (воздух)
Объём теплоносителя в радиаторе одного фотоприёмника, (л) и расход теплоносителя в одном фотоприёмнике, л/мин	0,1; ... 0,1 – 1 ... (регулируемый)
Температура теплоносителя на выходе и температура эксплуатации модуля, °С	+ 35 ... + 55; - 60 ... + 100
Длина × высота × ширина фотоэлектрического приёмника, мм	270 × 75 × 10
Длина × высота × ширина солнечного модуля в сложенном состоянии, мм	280 × 230 × 110
Длина × высота × ширина солнечного модуля в разложенном состоянии, мм	280 × 340 × 590
Масса фотоприёмника без теплоносителя и масса солнечного модуля с одним фотоприёмником, кг	0,3; 0,9
Электрические показатели фотоприёмника при концентрации солнечного излучения 3 / 6 крат	
Ток короткого замыкания и ток в рабочей точке, А	22,8; 18,3 / 45,6; 36,6
Напряжение холостого хода и напряжение в рабочей точке, В	1,2; 1,03 / 1,3; 1,1
Электрическая мощность, Вт	18,9 / 37,7 (27,4 / 54,8)*
Коэффициент заполнения вольтамперной характеристики и электрический коэффициент фотопреобразования, %	69; 17 (25)*

В скобках (*) указаны электрические значения фотоэлектрических преобразователей при концентрации солнечного излучения 3 и 6 крат с использованием двусторонних высоковольтных матричных кремниевых фотоэлектрических преобразователей с электрическим коэффициентом полезного действия около 25% [9, 10], которые планируются использовать в серийном производстве. Двусторонние матричные фотоэлектрические преобразователи сохраняют высокую электрическую эффективность при высокой степени концентрированного солнечного излучения и, соответственно, электрическая мощность одного модуля возрастёт до 55 Вт.

5. Теплофотоэлектрический концентраторный модуль с термодинамическим фотопреобразователем в виде двигателя Стирлинга

Наряду с фотоэлектрическим преобразованием в солнечных модулях предложен концентраторный солнечный модуль с термодинамическим преобразо-

вателем, позволяющий получать как электрическую энергию, так и тепловую энергию в виде нагретой воды, которая отбирает теплоту от охлаждаемого цилиндра двигателя Стирлинга. С целью создания предложенного солнечного модуля разработана методика расчёта профиля концентратора параболического типа, обеспечивающего равномерную совмещённость концентрированным солнечным излучением фокальной области концентратора, которая находится на поверхности горячего цилиндра двигателя Стирлинга (рисунок 12 слева) [25,26]. Разработанный теплофотоэлектрический модуль состоит из концентратора солнечного излучения параболического типа, который обеспечивает фокальную область 2 на поверхности цилиндрического фотоприёмника 3 концентрированным солнечным излучением. Охлаждаемый цилиндр двигателя Стирлинга в своей конструкции имеют радиатор водяного охлаждения, где происходит охлаждение рабочего тела двигателя (воздух) и нагрев теплоносителя солнечного модуля (вода) (рисунок 12 справа).



Рис. 12. Схема теплофотоэлектрического солнечного модуля с горячим цилиндром двигателя Стирлинга (слева) и концентраторный солнечный модуль с двигателем Стирлинга (справа)
 Fig. 12. Scheme of the photovoltaic thermal solar module with the hot cylinder of the Stirling engine (on the left) and the concentrator solar module with a Stirling engine (on the right)

Во время натурных испытаний солнечного концентраторного модуля с двигателем Стирлинга были измерены температуры всех рабочих областей двигателя Стирлинга (на рисунке 13 – области 1, 2, 3 относятся к горячему цилиндру, а области 4 и 5 к охлаждаемому цилиндру двигателя) при работе его сов-

местно с двумя концентраторами солнечного излучения с диаметрами 0,5 м и 1 м и водяным охлаждением радиатора охлаждаемого цилиндра двигателя. Расход теплоносителя при работе солнечного модуля составил 0,25 л/мин, а его температура на выходе из радиатора двигателя была в районе 36 - 37 °С.

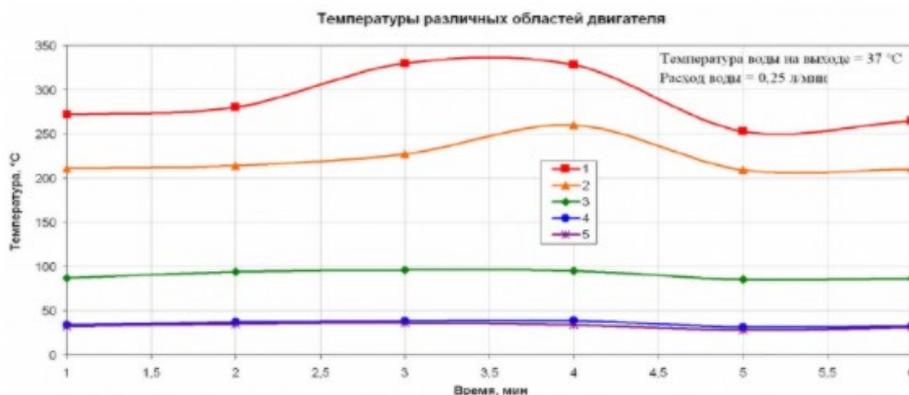


Рис. 13. Температурные режимы работы различных областей двигателя Стирлинга теплофотоэлектрического концентраторного модуля.

Fig. 13. Temperature modes of operation of various areas of the Stirling engine of the photovoltaic thermal concentrator module.



В таблице 5 представлены основные параметры теплофотоэлектрического концентраторного модуля с двигателем Стирлинга и водяным охлаждением.

Таблица 5

Параметры теплофотоэлектрического концентраторного модуля с двигателем Стирлинга и водяным охлаждением

Table 5

Parameters of the photovoltaic thermal concentrator module with Stirling engine and water cooling

Параметр, единица измерения	Величина
Модель двигателя Стирлинга	УДС-1
Рабочая температура двигателя Стирлинга, °С	200 – 700
Длина × ширина × высота двигателя Стирлинга, мм	450 × 250 × 150
Длина × ширина × высота солнечного модуля, мм	1050 × 1050 × 850
Количество, тип и площадь миделя концентратора солнечного излучения, м ²	2; параболический; 0,78
Тип теплоносителя, его расход, (л/мин) и температура на выходе из радиатора двигателя, °С	Вода (воздух); 0 (воздушное охлаждение) ... 0,5; 35 – 40 (расход 0,25 л/мин)
Масса солнечного модуля, кг	5,5

При подключении генератора электрического тока к валу двигателя Стирлинга потребитель получает наряду с тепловой энергией в виде нагретого теплоносителя ещё и электрическую энергию. Благодаря равномерной освещённости поверхности горячего цилиндра двигателя Стирлинга происходит более быстрый и равномерный прогрев его рабочего тела, а срок службы двигателя Стирлинга составляет не менее срока службы фотоэлектрических преобразователей.

Заключение

Таким образом, разработанные теплофотоэлектрические модули планарной и концентраторной конструкции позволяют производить автономное или параллельное с существующей энергосетью энергоснабжение потребителей. Использование в конструкциях теплофотоэлектрических модулей параболических концентраторов, высоковольтных матричных фотоэлектрических преобразователей, а также двухкомпонентного полисилоксанового компаунда увеличивает общую эффективность солнечных модулей и срок их службы. Наряду с выработкой электрической и тепловой энергии кровельные панели также обеспечивают строительную и защитную функцию зданий, а использование в их основе вторичного пластика позволяет решить проблемы с его вторичным использованием и удешевляет производство. Также значительный потенциал имеют теплофотоэлектрические концентраторные солнечные модули с двигателями Стирлинга, электрическая эффективность которых может быть больше электрической эффективности фотоэлектрических преобразователей, а срок службы не менее срока службы фотоэлектрических преобразователей.

Благодарности

Исследования проводились в рамках финансирования работ по Гранту "Молодой преподаватель МНИИТа" на 2016 – 2019 г. и Советом по грантам Президента Российской Федерации в форме Стипендии Президента Российской Федерации СП-4051.2018.1 на 2018 – 2020 г. для моло-

дых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Список литературы

1. Adomavicius, V., Kharchenko, V., Valickas, J. & Gusarov, V. RES-based microgrids for environmentally friendly energy supply in agriculture // Proceedings of 5th International Conference TAE. – 2013 – P. 51-55.
2. Kharchenko, V., Gusarov, V. & Bolshev, V. Reliable Electricity Generation in RES-Based Microgrids // Handbook of Research on Smart Power System Operation and Control. – 2019 – P.162-187.
3. Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S. & Sopian, K. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011– 15 – P. 352-365.
4. Kharchenko, V., Nikitin, B., Tikhonov, P. & Gusarov, V. Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions // Proceedings of 5th International Conference TAE. – 2013 – P. 309-313.
5. Zharkov, S.V. Assessment and enhancement of the energy supply system efficiency with emphasis on the cogeneration and renewable as main direction for fuel saving // International Journal of Energy Optimization and Engineering. – 2014 – 3(4) . – P. 1 – 20
6. Nesterenkov, P. & Kharchenko, V. Thermo Physical Principles of Cogeneration Technology with Concentration of Solar Radiation // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019 –vol. 866 – P. 117-128, doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_12.
7. Sevela, P. & Olesen, B.W. Development and Benefits of Using PVT Compared to PV // Sustainable Building Technologies. – 2013 – P. 90-97.
8. Панченко В.А. Солнечные модули Федерального научного агроинженерного центра ВИМ различных типов и конструкций для автономного энергоснабжения // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. – 2017 – С. 1030 – 1033
9. Стребков Д.С., Поляков В.И., Панченко В.А. Исследование высоковольтных солнечных кремние-



вых модулей // Альтернативная энергетика и экология. – 2013 – № 6-2 (128). – С.36-42.

10. 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

11. Buonomano, A., Calise, F. & Vicidimini, M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors // Energies. – 2016 – 9 – P. 497

12. Rawat, P., Debbarma, M., Saurabh Mehrotra et al. Design, development and experimental investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system // International Journal of Science, Environmental Technology. – 2014 – 3(3). – P. 1173-1183.

13. Chen, Y., Hsu, W., Lin, Y., & Su, C. Parametric study of a solar concentrator composed of a flat fresnel lens and a reflective secondary optical element // 30th ISES Biennial Solar World Congress. – 2011 – P. 716-722.

14. Kemmoku, Y., Araki, K. & Oke, S. Long-term performance estimation of a 500X concentrator photovoltaic system // 30th ISES Biennial Solar World Congress. – 2011 – P. 710-716.

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

16. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S., Libra M. Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology // Solar Energy. – 2012 – 86, № 10 – P. 3103 - 3108

17. Стребков Д.С., Персиц И.С., Панченко В.А. Солнечные модули с увеличенным сроком службы // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014 – № 3(8). – С. 154 – 158

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

19. Патент РФ на изобретение № 2557272 Стребков Д.С., Кирсанов А.И., Иродионов А.Е., Панченко В.А., Майоров В.А. Кровельная солнечная панель. Заявка: 2014123409/20, 09.06.2014. Опубликовано: 20.07.2015. Бюл. № 20

20. Panchenko V. Roofing Solar Panels of Planar and Concentrator Designs // International Journal of Energy Optimization and Engineering. – 2020 – Vol. 9, I. 4, 2020 – P. 20 – 40, DOI: 10.4018/IJEOE.2020100102.

21. Патент РФ на изобретение № 2612725 Стребков Д.С., Кирсанов А.И., Панченко В.А. Гибридная кровельная солнечная панель. Заявка: 2016111201, 28.03.2016. Опубликовано: 13.03.2017. Бюл. № 8

22. Гусаров В.А., Харченко В.В., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечная электростанция для параллельной работы // Альтернативная энергетика и экология. – 2013 – № 2 (119). – С.37-43.

23. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболоторическим концентратором // Альтернатив-

ная энергетика и экология. – 2013 – № 1-2 (118). – С.35-39.

24. Kharchenko V., Panchenko V., Tikhonov P., Vasant P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. – 2018 – P. 86 –119, DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch004.

25. Майоров В.А., Панченко В.А. Исследование характеристик солнечного концентратора в установке с двигателем Стирлинга // Энергетик. – 2013 – № 2 – С. 40-42.

26. Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечная установка с параболоторическим концентратором и двигателем Стирлинга // Техника в сельском хозяйстве. – 2013 – № 1 – С.14-16.

References

1. Adomavicius, V., Kharchenko, V., Valickas, J. & Gusarov, V. RES-based microgrids for environmentally friendly energy supply in agriculture // Proceedings of 5th International Conference TAE. – 2013 – P. 51-55.

2. Kharchenko, V., Gusarov, V. & Bolshev, V. Reliable Electricity Generation in RES-Based Microgrids // Handbook of Research on Smart Power System Operation and Control. – 2019 – P.162-187.

3. Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S. & Sopian, K. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011 – 15 – P. 352-365.

4. Kharchenko, V., Nikitin, B., Tikhonov, P. & Gusarov, V. Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions // Proceedings of 5th International Conference TAE. – 2013 – P. 309-313.

5. Zharkov, S.V. Assessment and enhancement of the energy supply system efficiency with emphasis on the cogeneration and renewable as main direction for fuel saving // International Journal of Energy Optimization and Engineering. – 2014 – 3(4). – P. 1 – 20

6. Nesterenkov, P. & Kharchenko, V. Thermo Physical Principles of Cogeneration Technology with Concentration of Solar Radiation // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019 –vol. 866 – P. 117-128, doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_12.

7. Sevela, P. & Olesen, B.W. Development and Benefits of Using PVT Compared to PV // Sustainable Building Technologies. – 2013 – P. 90-97.

8. Panchenko V.A. Solnechnye moduli Federal'no-go nauchnogo agroinzhenerenogo tsentra VIM razlichnykh tipov i konstruktсии dlya avtonomnogo ehnergosnabzheniya // Ekhkologicheskaya, promyshlennaya i ehnergeticheskaya bezopasnost'. – 2017 – S. 1030 – 1033

9. Strebkov D.S., Polyakov V.I., Panchenko V.A. Issledovanie vysokovolt'nykh solnechnykh kremnie-vykh modulei // Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya. – 2013 – № 6-2 (128). – С.36-42.

10. Panchenko V.A., Strebkov D.S., Polyakov V.I., Arbuzov YU.D. Vysokovolt'nye solnechnye moduli s napryazheniem 1000 V // Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya. – 2015 – № 19 (183). – С. 76 – 81



11. Buonomano, A., Calise, F. & Vicidimini, M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors // *Energies*. – 2016 – 9 – P. 497
12. Rawat, P., Debbarma, M., Saurabh Mehrotra et al. Design, development and experimental investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system // *International Journal of Science, Environmental Technology*. – 2014 – 3(3). – P. 1173-1183.
13. Chen, Y., Hsu, W., Lin, Y., & Su, C. Parametric study of a solar concentrator composed of a flat fresnel lens and a reflective secondary optical element // 30th ISES Biennial Solar World Congress. – 2011 – P. 716-722.
14. Kemmoku, Y., Araki, K. & Oke, S. Long-term performance estimation of a 500X concentrator photovoltaic system // 30th ISES Biennial Solar World Congress. – 2011 – P. 710-716.
15. Sinitsyn S.A., Strebkov D.S., Panchenko V.A. Parketirovanie poverkhnosti parabolicheskogo konsentratora solnechnogo teplofotoehlektricheskogo modulya po zadannym differentsial'no-geometricheskim trebovaniyam // *Geometriya i grafika*. – 2019 – T. 7, № 3 – S. 15 – 27
16. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S., Libra M. Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology // *Solar Energy*. – 2012 – 86, № 10 – P. 3103 - 3108
17. Strebkov D.S., Persits I.S., Panchenko V.A. Solnechnye moduli s uvelichennym srokom sluzhby // *Innovatsii v sel'skom khozyaistve*. – 2014 – № 3(8). – S. 154 – 158
18. Panchenko V.A. Modelirovanie teplofotoehlektricheskoi krovel'noi paneli dlya ehnergosnabzheniya ob'ektov // *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. – 2018 – №13 (65). – S. 143 – 158
19. Patent RF na izobretenie № 2557272 Strebkov D.S., Kirsanov A.I., Irodionov A.E., Panchenko V.A., Maiorov V.A. Krovel'naya solnechnaya panel'. Zayavka: 2014123409/20, 09.06.2014. Opublikovano: 20.07.2015. Byul. № 20
20. Panchenko V. Roofing Solar Panels of Planar and Concentrator Designs // *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. – 2020 – Vol. 9, I. 4, 2020 – P. 20 – 40, DOI: 10.4018/IJEEOE.2020100102.
21. Patent RF na izobretenie № 2612725 Strebkov D.S., Kirsanov A.I., Panchenko V.A. Gibridnaya krovel'naya solnechnaya panel'. Zayavka: 2016111201, 28.03.2016. Opublikovano:13.03.2017. Byul. № 8
22. Gusarov V.A., Kharchenko V.V., Maiorov V.A., Panchenko V.A. Solnechnaya ehlektrostantsiya dlya paral-lel'noi raboty // *Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. – 2013 – № 2 (119). – S.37-43.
23. Strebkov D.S., Maiorov V.A., Panchenko V.A. Solnechnyi teplo-fotoehlektricheskii modul' s parabolotoricheskim konsentratorem // *Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. – 2013 – № 1-2 (118). – S.35-39.
24. Kharchenko V., Panchenko V., Tikhonov P., Vasant P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply // *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. – 2018 – P. 86 –119, DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch004.
25. Maiorov V.A., Panchenko V.A. Issledovanie kharakteristik solnechnogo konsentratora v ustanovke s dvigatelem Stirlinga // *Ehnergetik*. – 2013 – № 2 – S. 40-42.
26. Maiorov V.A., Panchenko V.A. Solnechnaya ustanovka s parabolotoricheskim konsentratorem i dvigatelem Stirlinga // *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. – 2013 – № 1 – S.14-16.

Транслитерация по BSI



FC Expo Tokyo 2021 - международная выставка водородных и топливных элементов

с 3 по 5 марта

О выставке FC Expo Tokyo 2021

Выставка FC Expo Tokyo 2021 проводится с 3 по 5 марта в городе Токио, Япония.

Экспонируемые продукты и разделы выставки Вы можете посмотреть ниже, в блоке «Дополнительная информация». Полный список участников FC Expo Tokyo 2021 размещается на официальном сайте выставки и постоянно обновляется. Там же вы сможете найти экспонентов предыдущего года. Деловая программа FC Expo Tokyo 2021 обычно публикуется ближе к началу события.

exptomar.ru

