

УДК 620.91

**РАСЧЁТ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ  
ДВУСТОРОННЕГО ФОТОПРИЁМНИКА КОНЦЕНТРАТОРНОГО  
СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ****Панченко Владимир Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
Российский университет транспорта МИИТ, Москва,  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

**Чирский Сергей Павлович**

кандидат технических наук, доцент  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Аннотация**

В работе рассчитано тепловое состояние теплофотоэлектрического приёмника солнечного концентраторного модуля. Также тепловое состояние фотоприёмника визуализировано с помощью системы конечно-элементного анализа. Анализ тепловых полей позволяет проводить оптимизацию конструкции фотоприёмника и параметров теплоносителя. Использование тепловой энергии в фотоприёмнике позволяет повысить общую эффективность солнечного модуля.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, теплофотоэлектрический модуль, фотоэлектрические преобразователи, концентратор солнечного излучения, тепловое состояние.

**CALCULATION AND VISUALIZATION OF THE HEAT STATE OF THE  
BILATERAL RECEIVER OF THE CONCENTRATOR SOLAR MODULE****Vladimir A. Panchenko**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher  
Russian University of Transport, Moscow,  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

**Sergey P. Chirskiy**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Bauman MSTU, Moscow

## ABSTRACT

In the work, the thermal state of the photovoltaic thermal receiver of the solar concentrator module is calculated. Also, the thermal state of the photodetector is visualized using a finite element analysis system. Analysis of thermal fields allows optimization of the design of the photodetector and the parameters of the coolant. The use of thermal energy in the photodetector improves the overall efficiency of the solar module.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic thermal module, photovoltaic converters, solar radiation concentrator, thermal state.

Солнечные модули в последние десятилетия внедряются активнее других преобразователей возобновляемой энергии. Самыми популярными преобразователями солнечной энергии являются солнечные фотоэлектрические модули [1 – 3]. Для увеличения эффективности солнечных модулей и возможности использования тепловой энергии активно развиваются теплофотоэлектрические солнечные модули планарной конструкции [4 – 6]. Для уменьшения количества фотоэлектрических преобразователей целесообразно использование концентраторов солнечного излучения в теплофотоэлектрических модулях [7, 8]. К профилю и погрешности изготовления поверхности подобных концентраторов предъявляются высокие требования [9 – 11]. Также детальному расчёту подлежат фотоприёмники концентраторных теплофотоэлектрических модулей. Подобные расчёты целесообразно проводить в системах конечно-элементного анализа.

На рисунке 1 представлен фотоприёмник концентраторной солнечной установки, который состоит из двусторонних фотоэлектрических преобразователей, охлаждаемых с двух сторон теплоносителем, заключённым в стеклянную трубу.

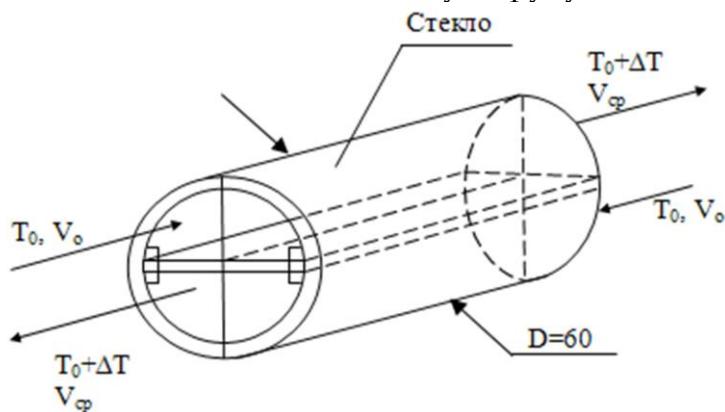


Рисунок 1. Схема фотоприёмника концентраторного солнечного модуля

Необходимо оценить изменение температуры фотоэлектрических преобразователей во времени по координате  $X$  до стационарного режима при изменении начальных условий ( $V_0$  и  $T_0$ ) по нескольким вариантам.

Начальные условия: начальная температура всех элементов конструкции  $T_0$ . При  $t = 0$ ,  $t_n = t_0$ ,  $q_{\text{выд}} = 0$ , при  $t > 0$ ,  $q = q_{\text{выд}} = 3,58 \text{ Вт/см}^2$ .

Расчетная схема: две полуцилиндрические полости. Размеры пластины фотоэлектрических преобразователей:  $60 \times 1250 \text{ мм}$ ;  $60 \times 600 \text{ мм}$ .

Профиль скорости: на выходе – как для ламинарного течения или треугольником с прилипанием к стенке (вариант 2); на входе – равномерно по  $V_0$  (вариант 1) (рисунок 2).

Жидкость: силиконовое масло.

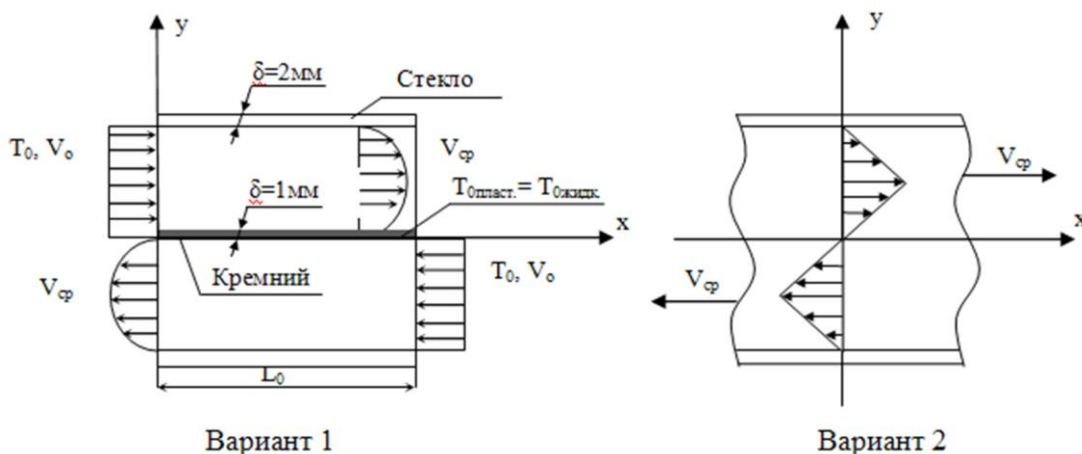


Рисунок 2. Профили скоростей теплоносителя для двух вариантов расчёта фотоприёмника

Варианты расчетов проводились для  $L_0 = 1250$  мм при  $T_0 = 18$  °С ( $V_0 = 0,2$  м/с и  $0,4$  м/с),  $T_0 = 25$  °С ( $V_0 = 0,2$  м/с и  $0,4$  м/с);  $L_0 = 600$  мм при  $T_0 = 18$  °С ( $V_0 = 0,2$  м/с и  $0,4$  м/с),  $T_0 = 25$  °С ( $V_0 = 0,2$  м/с и  $0,4$  м/с).

Теплофизические свойства конструктивных элементов: алюминий: теплопроводность  $160$  Вт/м·К, теплоемкость  $880$  Дж/кг·К, плотность  $2800$  кг/м<sup>3</sup>; кремний: теплопроводность  $120$  Вт/м·К, теплоемкость  $800$  Дж/кг·К, плотность  $2300$  кг/м<sup>3</sup>; стекло: теплопроводность  $0,46$  Вт/м·К, теплоёмкость  $800$  Дж/кг·К, плотность  $2400$  кг/м<sup>3</sup>; силиконовое масло: полиметилсилоксан ПМС-10: теплопроводность:  $0,167$  Вт/м·К, теплоемкость  $1549$  Дж/кг·К, динамическая вязкость при  $20$  °С  $0,1$  Па·с, при  $50$  °С  $0,06$  Па·с, плотность  $920$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент температурного расширения  $0,000012$  1/К.

Расчет производится только для одного из полуцилиндров. Для скорости потока  $V = 0,2$  м/с и температуры жидкости на входе  $T_A = 25$  °С =  $298$  К.

Площадь поперечного сечения полуцилиндра:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot 2} = 0,001414 \text{ м}^2 \quad (1)$$

Гидравлический диаметр рассматриваемого сечения:

$$D = \frac{4 \cdot S}{P} = \frac{4 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot 2} \right)}{\frac{\pi \cdot d}{2} + d} = 0,037 \text{ м} \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения,  $P$  – смоченный периметр.

Характерный размер системы – гидравлический диаметр  $D$ .

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} = \frac{920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,037 \text{ м}}{0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 67 \quad (3)$$

$Re < 2000$  следовательно, режим течения – ламинарный.

Число Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C}{\lambda} = \frac{0,1 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 1549 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}{0,167 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}} = 928 \quad (4)$$

Число Гретца:

$$Gz = \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot l} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{\pi \cdot 0,037 \dot{i}}{4 \cdot 0,6 \dot{i}} \cdot 120 \cdot 928 = 3003 \quad (5)$$

$Gz > 10$  следовательно, труба короткая.

Для случая ламинарного течения несжимаемой жидкости в короткой цилиндрической трубе круглого сечения число Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = 1,86 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{\dot{n}0}}\right)^{0,14}, \quad (6)$$

где  $\mu_{\text{ст}} = 0,1$  - вязкость жидкости при температуре стенки (считается незначительной зависимостью вязкости от температуры), тогда  $Nu = 43,9$ .

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = 200,2 \frac{\text{А}\dot{\delta}}{\dot{i}^2 \cdot \hat{E}} \quad (7)$$

Ширина фотопреобразователей  $H = 0,6$  м.

Удельный поток энергии на фотопреобразователи  $Q_s = 35800$  Вт/м<sup>2</sup>.

Энергия на единицу длины фотопреобразователей:

$$q_L = Q_s \cdot H = 35800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot 0,06 \text{ м} = 2149 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \quad (8)$$

Считается, что тепловая энергия от фотопреобразователей отводится в весь объем охлаждающей жидкости. Тогда прирост температуры жидкости на единицу длины в стационарном состоянии можно определить по формуле:

$$dT_{liq} = \frac{q_L}{V \cdot \rho \cdot S \cdot \tilde{N}} = \frac{2149 \frac{\text{А}\dot{\delta}}{\dot{i}}}{0,2 \frac{\dot{i}}{\tilde{n}} \cdot 920 \frac{\hat{e}\tilde{a}}{\dot{i}^3} \cdot 0,001414 \dot{i}^2 \cdot 1549 \frac{\text{А}\ddot{a}\epsilon}{\hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{E}}} = 5,33 \frac{\hat{E}}{\dot{i}} \quad (9)$$

Зависимость температуры жидкости (в градусах Кельвина) от координаты  $X$  по оси цилиндра  $T_{liq}(x) = T_A + dT_{liq} \cdot x$  представлена на рисунке 3:

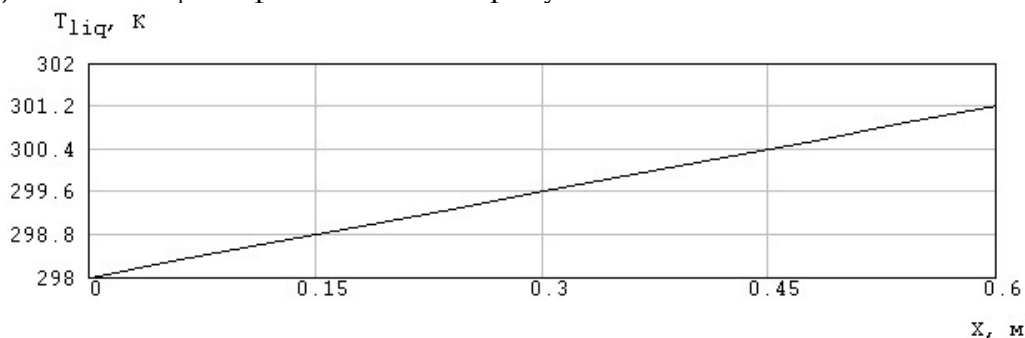


Рисунок 3. Зависимость температуры жидкости от координаты  $X$  по оси цилиндра

Температура фотопреобразователей в функции координаты  $X$  определяется по формуле (рисунок 4):

$$T_{pl}(x) = T_{liq}(x) + \frac{Q_s \cdot H}{\alpha \cdot L \cdot H} \quad (10)$$

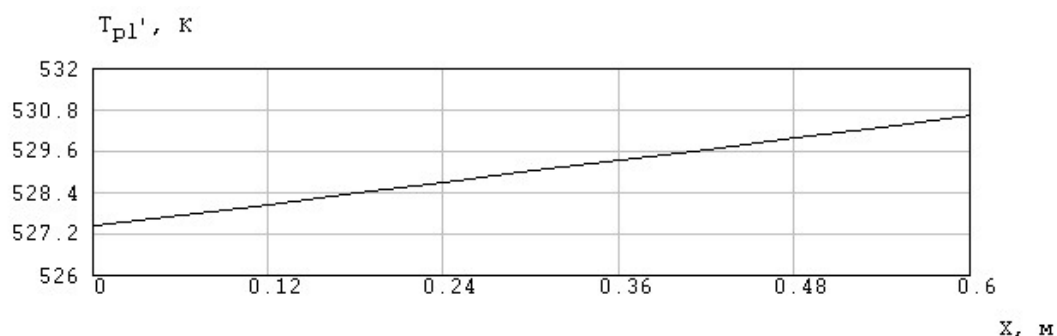


Рисунок 4. Температура фотопреобразователей в функции координаты  $X$

Так как во втором полуцилиндре жидкость течет в противоположном направлении, то результирующая температура фотопреобразователей составит:

$$T_{pl} = T_{pl}(x) + T_{pl}(L - x) = 476\text{K} \quad (11)$$

Объемный расход охлаждающей жидкости:

$$G_v = V \cdot S \cdot 1000 = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,001414 \text{ м}^2 \cdot 1000 = 0,565 \frac{\text{л}}{\text{с}} \quad (12)$$

Для остальных наборов входных параметров получены параметры, показанные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры теплового состояния при различных параметрах

Исходные данные								
$L_0$ , мм	1250				600			
$T_0$ , °C	18		25		18		25	
$V_0$ , м/с	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Результаты расчета								
Температура пластины $T_{pl}$ , °C	519	472	526	478	469	432	471	439
Расход жидкости $G_v$ , л/с	0,56	1,31	0,56	1,31	0,56	1,31	0,56	1,31
Потери давление в трубе $\Delta P$ , Па	222	444	222	444	107	213	107	213

Проверочный расчет теплового состояния выполнен с использование системы конечно-элементного анализа ANSYS Advanced CFD. Для сокращения времени, затрачиваемого на расчет, рассматривалась четверть трубы длиной 100 мм. Плоскость YZ является плоскостью симметрии. Твердотельная модель приведена на рисунке 5 слева. Конечно-элементная сетка представлена на рисунке 5 справа.

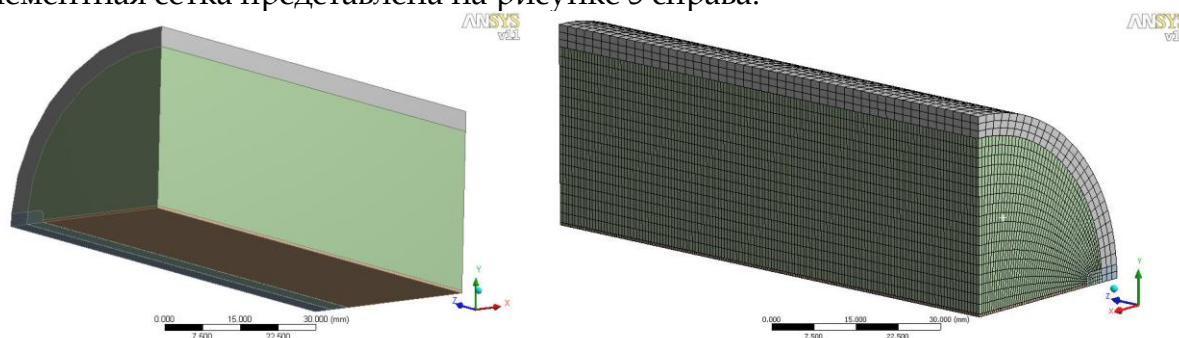


Рисунок 5. Твердотельная модель (слева) и конечно-элементная сетка модели (справа)

Число элементов в модели составляет 156598, число узлов в модели составляет 183516. Расчетная схема модели показана на рисунке 6.

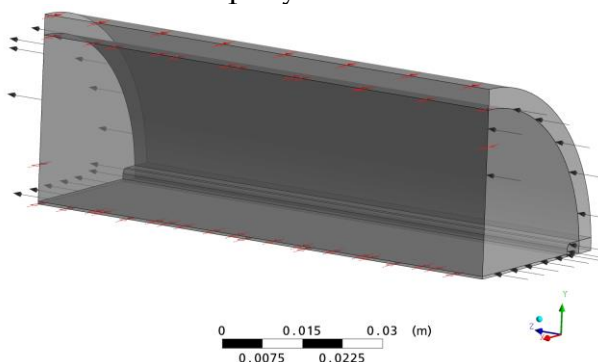


Рисунок 6. Расчетная схема модели фотоприёмника

Результат расчета для ламинарного потока со скоростью  $V = 0,2$  м/с при температуре жидкости на входе  $T_A = 25$  °С = 298 К представлен на рисунке 7.

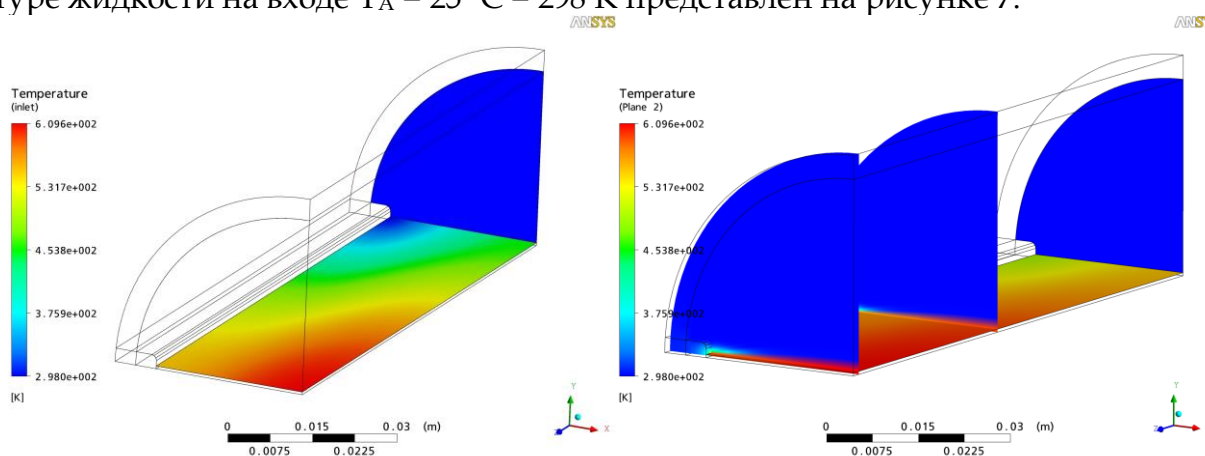


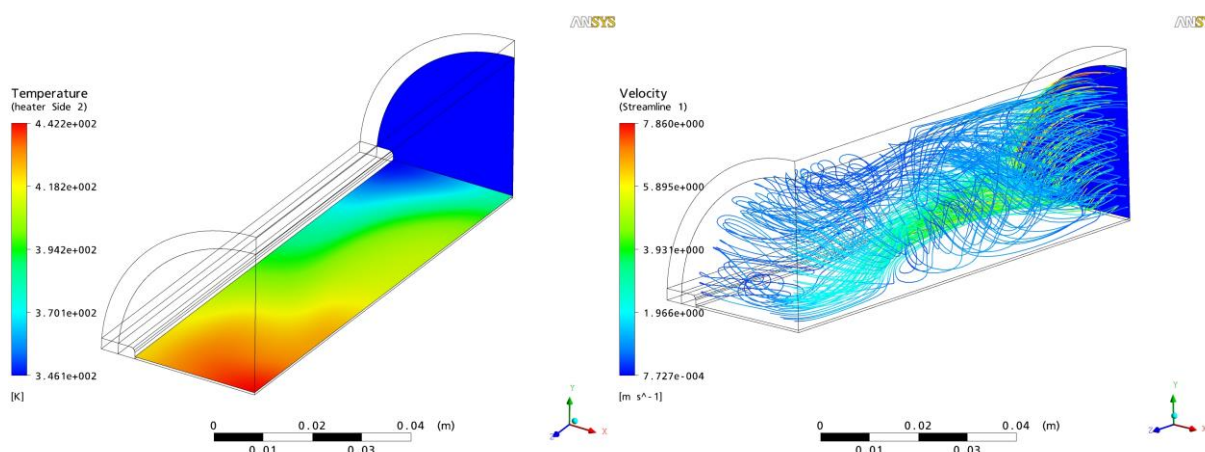
Рисунок 7. Тепловое состояние фотоприёмника при ламинарном потоке со скоростью  $V = 0,2$  м/с и температуре жидкости на входе  $T_A = 25$  °С

Различие значений температуры начальной части фотоэлектрического приёмника, полученных в предварительном расчете и с помощью моделирования, объясняется следующим: в предварительном расчете используются формулы для цилиндрической трубы круглого сечения. На самом деле сечение трубы – полукруг.

Ламинарный поток не перемешивается, в результате чего тепло от фотоэлектрических преобразователей отводится в тонкий слой жидкости, в результате скорость роста температуры фотоэлектрического преобразователя значительно увеличивается и на расстоянии 0,1 м от входа теплоносителя температура достигает 610 К.

Необходимо обеспечить интенсивное перемешивание потока. Это повысит теплоотдачу от фотоэлектрических преобразователей, снизит их температуру и скорость её роста.

На рисунке 8 показано распределение полей температур фотоприёмника и скорость теплоносителя при интенсификации течения теплоносителя.



*Рисунок 8. Тепловое состояние (слева) и скорость теплоносителя (справа) при турбулизированном потоке*

При турбулизации потока теплоносителя температура фотопреобразователей уменьшилась, однако есть потенциал для её дальнейшего снижения с помощью оптимизации параметров течения теплоносителя и конструкции фотоприёмника. Для ещё большего снижения температуры фотопреобразователей необходимо интенсифицировать течение теплоносителя или использовать в качестве теплоносителя другую жидкость.

Таким образом, моделирование теплового состояния фотоэлектрического приёмника с помощью системы конечно-элементного анализа позволяет визуализировать тепловые поля и скорости теплоносителя для дальнейшей оптимизации теплового состояния фотоприёмника.

Использование теплофотоэлектрических модулей позволяет потребителю получать электричество и тепловую энергию, а использование концентраторов солнечного излучения экономит количество фотоэлектрических преобразователей.

### Список литературы

1. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 – 29.
2. 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.
3. Дегтярёв К.С., Панченко В.А. Развитие и реализованные проекты солнечной энергетики в России // Сантехника, отопление, кондиционирование, №9, 2019, с. 74-79.
4. Стребков Д.С., Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Обзор различных конструкций солнечных теплофотоэлектрических модулей (гибридных коллекторов) // Инновации в сельском хозяйстве. № 3 (13), 2015, с. 199 – 203.
5. Филиппченкова Н.С., Панченко В.А. Разработка и исследование солнечных теплофотоэлектрических модулей // Инновации в сельском хозяйстве, № 5 (20), 2016, с. 136– 141.
6. Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Теплофотоэлектрические бесконцентраторные солнечные модули (гибридные солнечные коллекторы) // Инновации в сельском хозяйстве, № 5 (15), 2015, с. 128 – 133.

7. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Исследование концентраторной установки с матричными солнечными элементами // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2012, № 2, с. 14-16.
8. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 1-2 (118), с. 35-39.
9. 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.
10. Синицын С.А. Моделирование линейных погрешностей при конструировании поверхности концентратора солнечного модуля // Научный электронный журнал Меридиан, 2020, № 4 (38), с. 219-221.
11. Синицын С.А. Информационная методика управления качеством поверхности солнечного концентратора, заданной дискретным множеством точек // E-Scio, 2020, № 1 (40), с. 421-427.

### References

1. Panchenko V.A. Review and application of solar modules developed and manufactured by GNU VIESH // Bulletin of VIESH, 2014, No. 4 (17), p. 20 – 29 [in Russian].
2. Panchenko V.A. Solar Modules of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM of various types and designs for autonomous energy supply // Ecological, industrial and energy safety, 2017, p. 1030 – 1033 [in Russian].
3. Degtyaryov K.S., Panchenko V.A. Development and implemented projects of solar energy in Russia // Plumbing, heating, air conditioning, No. 9, 2019, p. 74-79 [in Russian].
4. Strebkov D.S., Panchenko V.A., Filippchenkova N.S. Overview of various designs of solar thermal photovoltaic modules (hybrid collectors) // Innovations in agriculture, No. 3 (13), 2015, p. 199 – 203 [in Russian].
5. Filippchenkova N.S., Panchenko V.A. Development and research of solar photovoltaic thermal modules // Innovations in agriculture, No. 5 (20), 2016, p. 136–141 [in Russian].
6. Panchenko V.A., Filippchenkova N.S. Photovoltaic thermal concentratorless solar modules (hybrid solar collectors) // Innovations in agriculture, No. 5 (15), 2015, p. 128 – 133 [in Russian].
7. Strebkov D.S., Mayorov V.A., Panchenko V.A. Study of a concentrator plant with matrix solar cells // Mechanization and electrification of agriculture, 2012, No. 2, p. 14-16 [in Russian].
8. Strebkov D.S., Mayorov V.A., Panchenko V.A. Solar photovoltaic thermal module with a parabolic concentrator // Alternative energy and ecology, 2013, No. 1-2 (118), p. 35-39 [in Russian].
9. 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, 2019, V. 7, No. 3, p. 15 – 27 [in Russian].
10. Sinitsyn S.A. Modeling linear errors in constructing the surface of a solar module concentrator // Scientific electronic journal Meridian, 2020, No. 4 (38), p. 219-221 [in Russian].
11. Sinitsyn S.A. An information technique for controlling the surface quality of a solar concentrator defined by a discrete set of points // E-Scio, 2020, No. 1 (40), p. 421-427 [in Russian].