

# ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ (05.14.08)

УДК 621.383

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-50-59

## Оценка влияния рабочей температуры поверхности солнечного модуля с голографическим концентратором на эффективность его работы

Б.Т. Шохзода, М.Г. Тягунов

С каждым годом область применения солнечных батарей увеличивается. Экологичность и отсутствие вредных выбросов в окружающую среду делает их альтернативным источником энергии для всех видов потребителей. Однако низкий коэффициент полезного действия (КПД) солнечных элементов и снижение их эффективности при изменении условий окружающей среды (температуры, приходов солнечной радиации) все еще являются одним из недостатков современной солнечной энергетики.

Рассмотрена конструкция солнечного модуля с голографическим концентратором. Исследован один из параметров, приводящих к снижению КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), — температура поверхности ФЭП. Оценены влияние рабочей температуры солнечного модуля с голографическим концентратором на КПД ФЭП, а также параметры системы водяного охлаждения для нее. Данные солнечной радиации и температура окружающей среды взяты из базы данных Meteonorm для района Дусти Республики Таджикистан (37,50 °N, 68,50 °E).

*Ключевые слова:* голографический концентратор, солнечный фотопреобразователь, температура.

*Для цитирования:* Шохзода Б.Т., Тягунов М.Г. Оценка влияния рабочей температуры поверхности солнечного модуля с голографическим концентратором на эффективность его работы // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 50—59. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-50-59.

## The Influence of the Operating Surface Temperature of the Solar Module Equipped with a Holographic Concentrator on Its Performance

B.T. Shokhzoda, M.G. Tyagunov

The application field of solar cell arrays increases from year to year. Owing to their environmental friendliness and absence of harmful emissions into the environment, these arrays are becoming an alternative source of energy for all types of consumers. However, the low efficiency of solar cells and drop of their output when changes occur in environmental conditions (temperature and arriving solar radiation) are still among the drawbacks of modern solar power technology.

The design of a solar module equipped with a holographic concentrator is considered. The photovoltaic converter (PC) surface temperature, which is one of the parameters leading to degradation of PC efficiency, is investigated. The effect the working temperature of a solar module equipped with a holographic concentrators has on the PC efficiency is evaluated, and the parameters of the water cooling system for this module are estimated. The solar radiation and ambient temperature data are taken from the METEONORM database for the Dusti region in the Republic of Tajikistan (located at 37.50 °N and 68.50 °E).

*Key words:* holographic concentrator, photovoltaic converter, temperature.

*For citation:* Shokhzoda B.T., Tyagunov M.G. The Influence of the Operating Surface Temperature of the Solar Module Equipped with a Holographic Concentrator on Its Performance. Bulletin of MPEI. 2019;4:50—59. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-50-59.

**Введение**

Повышение эффективности фотоэлектрических элементов достигается благодаря повышению КПД отдельных элементов, либо путем увеличения потока радиации, поступающего на них. Поток радиации растет с помощью концентраторов солнечной энергии [1]. Один из видов концентраторов — голографический концентратор в виде пленок (плоский голографический концентратор) [2 — 5].

**Конструкция голографического солнечного модуля**

В конструкции солнечного модуля с голографическим концентратором (СМСГК) использован голографический концентратор, предложенный в [6, 7]. Он представляет собой голограмму с многоуровневой дифракционной решеткой. Рабочий диапазон частот — 225...1000 нм, а максимальная эффективность, составляющая 95%, лежит в диапазоне 400...850 нм. Рабочий угол предложенного концентратора находится в пределах  $-700...+700^\circ$  [4]. Концентратор устанавливают параллельно с солнечными элементами в одной плоскости (рис. 1, 2).

Солнечный свет при падении на голографический концентратор в результате дифракции Брэгга [5] отражается под углом больше угла полного внутреннего отражения (ПВО). Затем, подчиняясь закону полного

внутреннего отражения, попадает на поверхность солнечных элементов. Конструкция СМСГК без охлаждения практически ничем не отличается от конструкции классических солнечных модулей (см. рис. 2). Однако эффект достигается не за счет увеличения выработки энергии одним модулем, а за счет снижения стоимости модуля при сохранении его производительности. Ряд фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и голографических концентраторов чередуются. Таким образом уменьшается количество используемых солнечных элементов. Применение данной конструкции позволяет уменьшить число относительно дорогих солнечных элементов, заменив их дешевыми (при массовом производстве) голографическими концентраторами (в виде пленки), что снижает стоимость модуля [4].

С концентрацией солнечной радиации (СР) растет температура ФЭП, и становится необходимым использование системы охлаждения того или иного вида для сохранения КПД ФЭП. Снижение электрических параметров солнечной энергии (СЭ) при увеличении радиации и температуры окружающей среды подтверждено данными публикации [8] для Республики Узбекистан, где климатические условия очень близки к условиям Республики Таджикистан.

Для того, чтобы понять, какова величина влияния повышения температуры для предложенной конструкции солнечного модуля при концентрации СР на мощность ФЭП, следует оценить зависимость температуры поверхности ФЭП от величины СР, степени ее концентрации, температуры окружающей среды, естественного охлаждения ФЭП под действием ветра и ряда иных факторов, и определить пути снижения отрицательного влияния повышения температуры на мощность ФЭП.

**Зависимость мощности солнечного модуля с голографическим концентратором от коэффициента концентрации**

Суммарная (прямая, рассеянная, отраженная) солнечная радиация имеет плотность  $R_{\text{сум}}$ , Вт/м<sup>2</sup>. Проходя через слой поликарбоната (см. рис. 1), одна часть (из общей площади солнечного модуля) напрямую попадает на солнечные элементы плотностью  $R_{\text{сэ}} = k_{\text{оп}} R_{\text{сум}}$ , а другая — на голографическую пленку плотностью  $R_{\text{гп}} = k_{\text{эм}} k_{\text{оп}} R_{\text{сум}}$  ( $k_{\text{оп}} = 0,87$  — оптический коэффициент проводимости поликарбонатного слоя). При отражении от голографического концентратора плотность энергии снижается на величину коэффициента эмиссии  $k_{\text{эм}}$  голографического концентратора (обычно  $k_{\text{эм}} = 0,97$ ). Таким образом, принимая во внимание коэффициент концентрации  $k_{\text{кон}}$ , связанный с отношением поверхности голографического концентратора и фотоэлектрического преобразователя (ФЭП),  $k_{\text{кон}} = S_{\text{гп}} / S_{\text{ФЭП}}$ , где  $S_{\text{гп}}$ ,  $S_{\text{ФЭП}}$  — площади поверхности голографического концентратора и ФЭП. Суммарная солнечная радиация  $R_{\text{ФЭП}}$ , падающая на ФЭП, равна [9]:

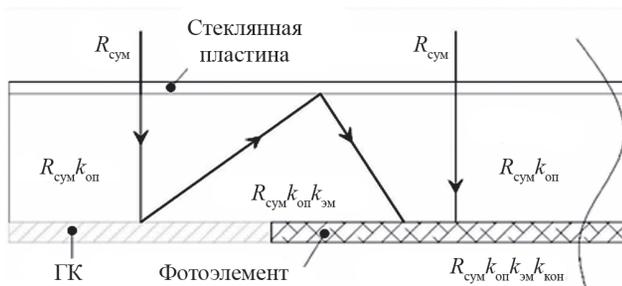


Рис. 1. Вид голографического солнечного модуля в разрезе:  $R_{\text{сум}}$  — суммарная солнечная радиация; ГК — голографический концентратор;  $k_{\text{оп}}$  — оптический коэффициент проводимости поликарбонатного слоя;  $k_{\text{эм}}$  — коэффициент эмиссии голографической пленки;  $k_{\text{кон}}$  — коэффициент концентрации

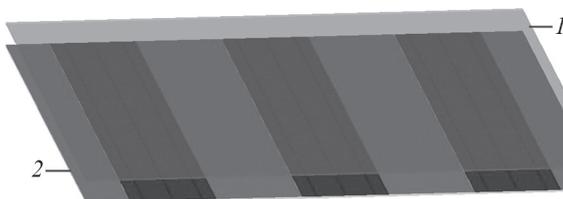


Рис. 2. Ламинированный фотоэлектрический модуль с голографическим концентратором: 1 — EVA пленка; 2 — прозрачная пластина с чередой голографических концентраторов (голографическая пленка) и СЭ

$$R_{\text{ФЭП}} = k_{\text{оп}} R_{\text{сум}} + k_{\text{оп}} k_{\text{эм}} R_{\text{сум}} = k_{\text{оп}} k_{\text{эм}} k_{\text{кон}} R_{\text{сум}}. \quad (1)$$

Мощность и КПД ФЭП в соответствии с [10] выглядят как:

$$\begin{aligned} N_{\text{ФЭП}} &= R_{\text{ФЭП}} \eta_{\text{ФЭП}}; \\ \eta_{\text{ФЭП}} &= \eta_0 (1 - \alpha_{\text{кор}} (T_{\text{ФЭП}} - 25)); \\ \alpha_{\text{кор}} &= \frac{1}{T_0 T_{\text{о.с}}}, \end{aligned}$$

где  $\eta_{\text{ФЭП}}$  — КПД ФЭП при изменении  $T_{\text{ФЭП}}$ ;  $\eta_0$  — КПД ФЭП при стандартных тестовых условиях (STC),  $\eta_0 = 20$ ;  $T_{\text{ФЭП}}$  — рабочая температура ФЭП;  $\alpha_{\text{кор}}$  — температурный коэффициент корреляции,  $\alpha_{\text{кор}} = 0,00435 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $T_0$  — максимальная температура для кристаллического кремния (Mono-Si), при которой КПД ФЭП снизится до нуля,  $T_0 = 270 \text{ } ^\circ\text{C}$  [7];  $T_{\text{о.с}}$  — температура окружающей среды в расчетной точке,  $^\circ\text{C}$ .

### Определение рабочей температуры фотоэлектрического преобразователя

Для определения рабочей температуры ФЭП с голографическим концентратором воспользуемся формулой [3].

$$T_{\text{ФЭП}} = T_{\text{о.с}} + R_{\text{ФЭП}},$$

где  $k$  — коэффициент корреляции температуры поверхности солнечного элемента и СР (температурный коэффициент корреляции), полученный экспериментальным путем для СМсГК,  $k = \{0,0075 \dots 0,05\} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$  (см. рис. 2) [9].

Температурный коэффициент корреляции необходим для определения температуры рабочего солнечного элемента на основе ее освещенности, температуры окружающей среды и факта воздействия солнечных элементов на друг друга. Исследование выполнено с использованием экспериментальной модели СМсГК, изображенной на рис. 3.

Экспериментальная модель состоит из трех видов солнечных модулей с голографическими концентраторами (рис. 3) [9]. У модели, размещенной в левой части установки, площадь концентраторов, установленных между фотоэлементами, в два раза превышает площадь



Рис. 3. Экспериментальная модель солнечного модуля с голографическим концентратором с тремя вариантами установки концентратора по отношению к ФЭП [3]

фотоэлементов, т. е. имеет отношение 2/1. Это говорит о том, что коэффициент концентрации равен 2. В модели, располагающейся в средней части установки, фотоэлементы размещены в середине модуля вплотную друг к другу, а голографический концентратор находится вокруг фотоэлементов. В модели в правой части установки площадь голографических концентраторов, размещенных между фотоэлементами, равна площади фотоэлементов, т. е. имеет отношение 1/1, и коэффициент концентрации равен единице. Три варианта модели взяты для определения влияния толщины голографических концентраторов (между рядами солнечных элементов) на температурный коэффициент СЭ.

В ходе эксперимента уточнялась величина температурного коэффициента корреляции  $k$  для различных моделей экспериментальной установки СМсГК. Как следует из рис. 4, 5, значение температурного коэффициента  $k$  варьируется от 0,0075 до 0,0250  $^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ .

Зависимость температурного коэффициента корреляции от прихода солнечной радиации может быть оценена путем линейной регрессии (рис. 6).

Коэффициент корреляции отношения температурного коэффициента корреляции  $k$  СМсГК от прихода СР  $R$  составляет  $K_{\text{кор}} = 0,999$  (см. рис. 6). В связи с этим можно сказать, что  $k$  и  $R$  связаны линейной зависимостью. Таким образом, формула для определения температуры поверхности ФЭП с голографическими концентраторами при коэффициенте концентрации равном 1 будет иметь следующий вид:

$$T_{\text{ФЭП}} = T_{\text{о.с}} + (2 \cdot 10^{-10} R_{\text{ФЭП}} + 0,0075) R_{\text{ФЭП}}. \quad (2)$$

Используя (2), получим зависимости температуры и КПД солнечного модуля от прихода СР и температуры окружающей среды в заданной точке (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1, эффективность модуля зависит от его температуры. Расчеты показывают, что при коэффициенте концентрации 1 и  $T_{\text{о.с}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$  температура ФЭП повышается до  $T_{\text{СМ.кон}} = 41 \text{ } ^\circ\text{C}$ , что вызывает снижение КПД фотопреобразования с 20 до 19%, а при  $T_{\text{СМ.кон}} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$  КПД ФЭП уменьшается с 20 до 18%. Данное относительно небольшое снижение КПД вызывает уменьшение выработки энергии ФЭП, которое вполне окупается снижением стоимости солнечной панели аналогичной мощности, в которой до 40% (в зависимости от степени концентрации) солнечных элементов заменяется дешевыми голографическими концентраторами [4].

Повышение температуры солнечных элементов снижает их работоспособность и долговечность [2, 3, 11, 12] и ухудшает экономические показатели применения концентраторов. Это значит, что предложенный солнечный модуль с голографическими концентраторами требует охлаждения, которое понизит потери КПД фотопреобразования [13, 14].

Рассмотрим конструкцию СМсГК и системой охлаждения, продемонстрированную на рис. 7.

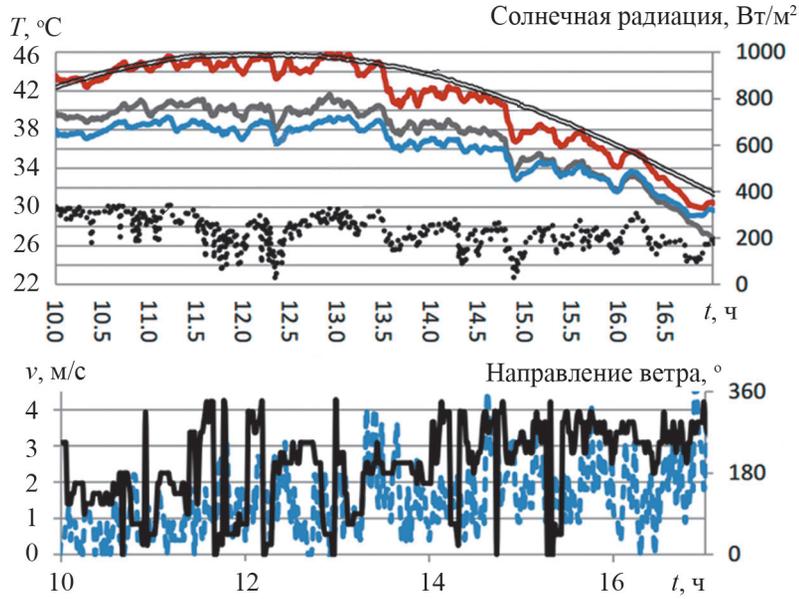


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности экспериментальных моделей СМсГК от внешних факторов:  
 —  $1 k_1$ ; —  $2 k_1$ ; — фотоэлемент целиком; ···· —  $T_{\text{о.с}}$ ; — радиация; —, —, — скорость и направление ветра

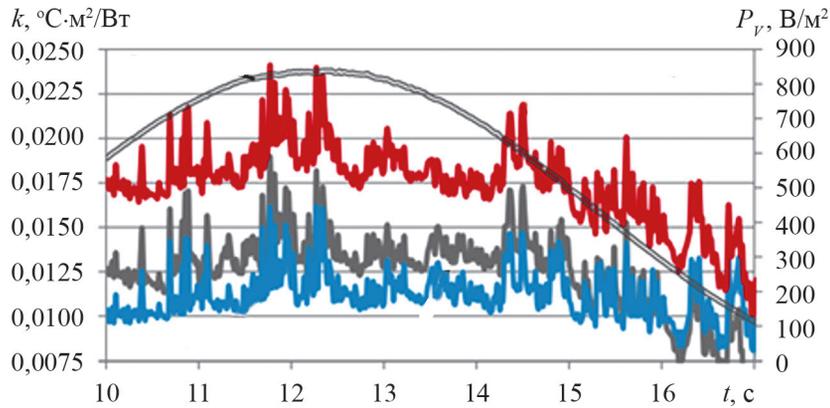


Рис. 5. Значение  $k$  для экспериментальной модели СМсГК:  
 —  $k_1 k_1$ ; —  $k_2 k_1$ ; — фотоэлемент целиком; — прямая радиация

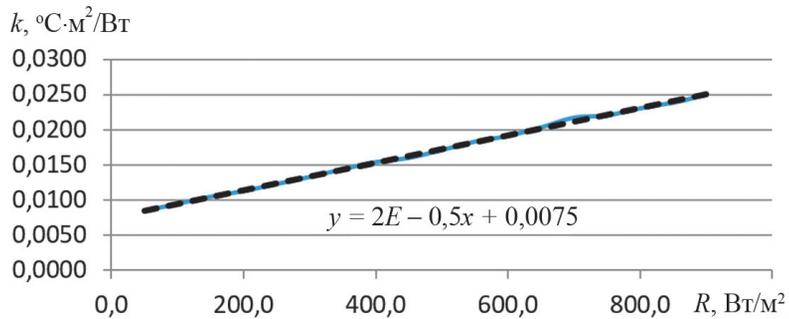


Рис. 6. Зависимость температурного коэффициента корреляции  $k_{\text{корр}}$  от прихода СР  $R$

Таблица 1

Зависимости температуры и КПД солнечного модуля от прихода солнечной радиации и температуры окружающей среды при максимальном приходе солнечной радиации (коэффициент концентрации  $k_{\text{кон}} = 1$ )

Параметры										
$t, \text{ч}$	$R_{\text{сум}}, \text{Вт/м}^2$	$R_{\text{см}}, \text{Вт/м}^2$	$R_{\text{кон}}, \text{Вт/м}^2$	$T_{\text{о.с.}}, \text{°C}$	$T_{\text{см}}, \text{°C}$	$T_{\text{см,кон}}, \text{°C}$	$\eta_{\text{см}}, \text{о.е.}$	$\eta_{\text{см,кон}}, \text{о.е.}$	$P_{\text{см}}, \text{Вт}$	$P_{\text{см,кон}}, \text{Вт}$
6	15	13,05	25,7	18,6	18,70	18,79	0,20	0,20	2,61	5,1
7	166	144,42	284,5	20,6	21,68	22,73	0,20	0,20	28,88	56,9
8	350	304,50	599,9	22,9	25,18	27,40	0,20	0,20	60,85	118,7
9	539	468,93	923,8	25,4	28,92	32,33	0,20	0,19	92,19	178,9
10	706	614,22	1210,0	27,8	32,41	36,88	0,19	0,19	118,89	229,5
11	838	729,06	1436,2	29,9	35,37	40,67	0,19	0,19	139,24	267,7
12	921	801,27	1578,5	31,8	37,81	43,64	0,19	0,18	151,32	290,1
13	947	823,89	1623,0	33,2	39,38	45,37	0,19	0,18	154,47	295,8
14	919	799,53	1575,0	34,2	40,20	46,01	0,19	0,18	149,34	286,2
15	833	724,71	1427,7	34,7	40,14	45,41	0,19	0,18	135,40	260,2
16	692	602,04	1186,0	34,7	39,22	43,60	0,19	0,18	112,96	218,0
17	512	445,44	877,5	34,1	37,44	40,68	0,19	0,19	84,27	163,5
18	328	285,36	562,2	32,8	34,94	37,02	0,19	0,19	54,60	106,6
19	149	129,63	255,4	31,1	32,07	33,02	0,19	0,19	25,13	49,3
20	10	8,70	17,1	29,1	29,17	29,23	0,20	0,20	1,71	3,4

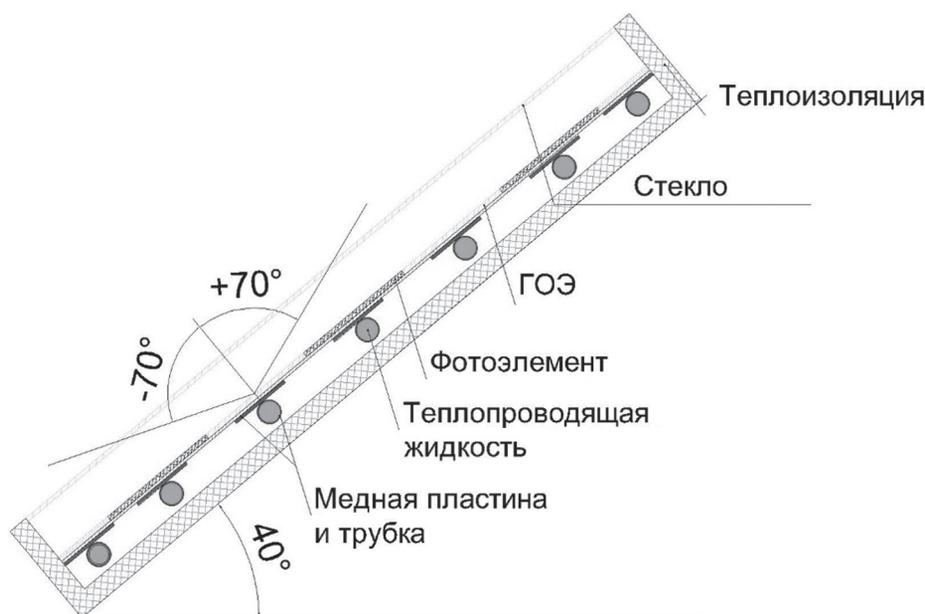


Рис. 7. Схема солнечного модуля с голографическим концентратором и водяным охлаждением

Конструкции, изображенные на рис. 1 и рис. 6, отличаются наличием системы водяного охлаждения. Нагретая в системе охлаждения вода может использоваться в системе отопления и горячего водоснабжения. Поэтому назовем предлагаемую конструкцию ко-генерационной солнечной установкой (КСУ), производящей, кроме электрической энергии, тепло.

Смоделируем режим работы КСУ в Matlab и Simulink [10], для этого разделим ее на сегменты. Пер-

вый сегмент представляет собой тепловой абсорбер «лист – труба», затем идет светопрозрачная подложка, на них наложен голографический концентратор. Второй сегмент ничем не отличается от первого, только вместо голографического концентратора расположен солнечный фотоэлемент (см. рис. 7, 8).

Поскольку голографический элемент выполняет функцию отражения (см. рис. 1), то в данный момент больше всего интересен второй сегмент с фотоэлемен-

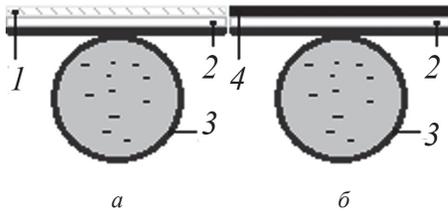


Рис. 8. Сегменты модели ГСУ с голографическим концентратором (а) и фотоэлементом (б):

1 — голографический концентратор; 2 — светопрозрачная подложка (пластина); 3 — тепловой абсорбер «лист – труба» с теплоносителем (вода); 4 — фотоэлемент

том. Фотоэлемент в КСУ является основным и наиболее уязвим к высоким температурам. На практике, при реализации конструкции КСУ можно отказаться от теплового абсорбера под голографическими концентраторами для уменьшения веса и общей стоимости КСУ, но выгоду покажут только технико-экономические расчёты. При моделировании работы голографического концентратора воспользуемся формулой (1).

Для создания модели сегмента КСУ с фотопреобразователем в Simulink возьмем полностью базовые элементы. Simulink-модель сегмента КСУ с фотоэлементом приведена на рис. 9. Общее тепловое сопротивление трубы — результат различных видов теплопередач (конвекции и теплопроводности) отдельных элементов сопротивлений (рис. 10). Блок трубы [15] в Simulink моделирует конвективное термическое сопротивление внутренней поверхности трубы и вязкий подогрев рабочей жидкости, блок теплопроводности — соответствующее сопротивление теплопередачи между внутренней и наружной поверхностями трубы.

Формула конвективной теплопередачи на стенке трубы выглядит как [15]:

$$G_H = G_{\text{конвек}} + G_{\text{кондук}}$$

Предполагается, что скорость теплового потока между жидкостью и стенкой трубы является результатом конвективного  $G_{\text{конвек}}$  и кондуктивного  $G_{\text{кондук}}$  (проводимость) теплообменов (законы конвективного теплообмена и чистой тепловой проводимости).

Кондуктивный теплообмен потока равен [15]:

$$G_{\text{кондук}} = \frac{k_r S_H}{D} (T_H - T_B),$$

где  $k_r$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $S_H$  — площадь поверхности стенки трубы (по периметру и длине трубы),  $m^2$ ;  $D$  — гидравлический диаметр трубы;  $T_H, T_B$  — значения температур стенки трубы и жидкости (воды), соответственно,  $^{\circ}C$ .

Тепловой поток за счет конвекции вычисляется как:

$$G_{\text{конвек}} = c_{pAvg} |\dot{m}_{Avg}| (T_H - T_{Bx}) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{hS_H}{c_{pAvg} |\dot{m}_{Avg}|}\right) \right],$$

где  $c_{pAvg}$  — средняя удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг $\cdot^{\circ}C$ ;  $|\dot{m}_{Avg}|$  — средняя масса воды, кг;  $h$  — коэффициент теплопередачи трубы;  $T_H, T_{Bx}$  — значения температур стенки трубы и жидкости на входе,  $^{\circ}C$ ;  $A$  — нижний индекс, обозначающий вход трубы (см. рис. 9).

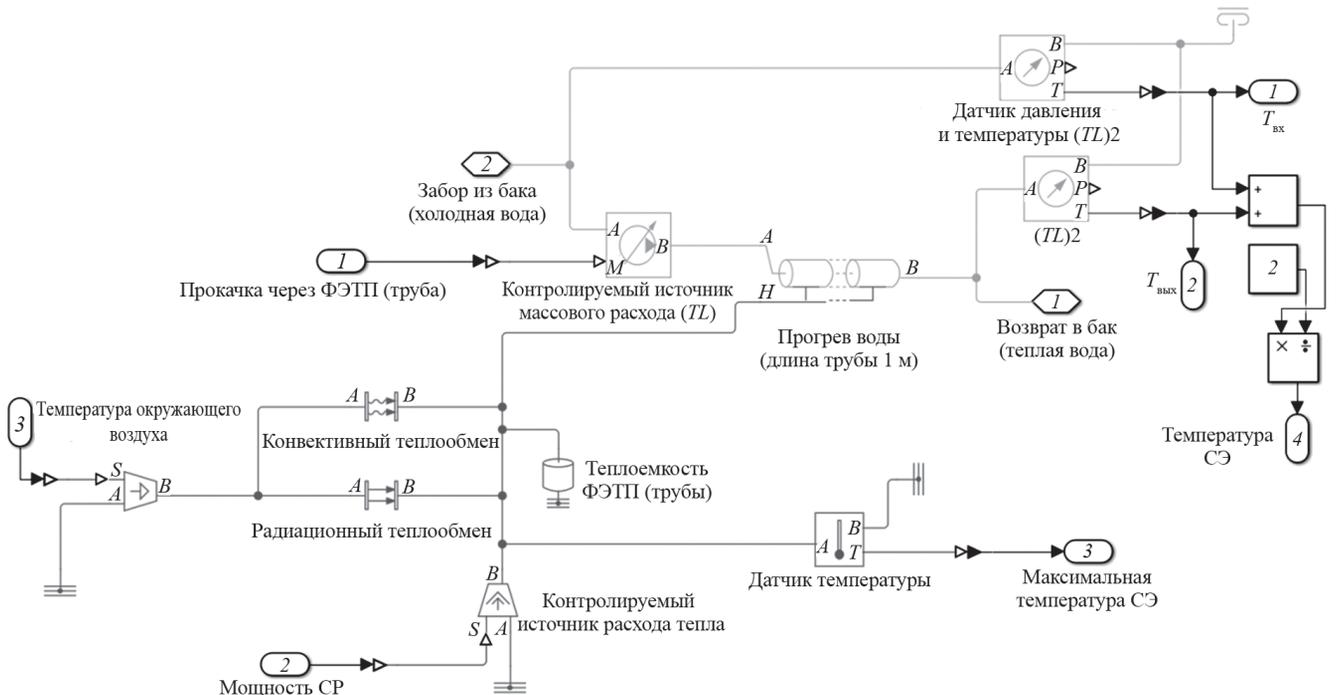


Рис. 9. Модуль сегмента ГСУ с фотоэлементом

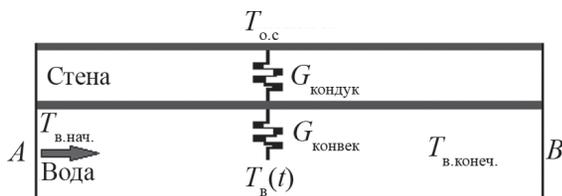


Рис. 10. Схема тепловых (кондуктивного и конвективного) сопротивлений трубы

При моделировании учитывалось, что температура поверхности фотопреобразователей равна температурам поверхности медного теплоотвода и трубы с прокачиваемым теплоносителем. В модели тепловых процессов за влияние температуры окружающей среды на трубу отвечает конвективный блок теплопередачи, представляющий собой теплообмен между окружающим воздухом и составной частью КСУ. Конвективный теплообмен (тепловой поток) описывается законом Ньютона:

$$Q = kS(T_A - T_B).$$

где  $S$  — площадь поверхности,  $m^2$ ;  $T_A$ ,  $T_B$  — значения температур в портах  $A$  и  $B$  трубы.

Конечное выражение энергетического баланса с учетом скорости накопления энергии в трубе вычисляется по формуле [8]:

$$E_1 = G_A + G_B + G_H - m_1 g \Delta z,$$

где  $E_1$  — энергия внутреннего объема жидкости, определяемая с точки зрения удельной внутренней энергии,  $E_1 = \rho_1 u_1 V$ ;  $\rho_1$  — плотность воды,  $kg/m^3$ ;  $u_1$  — удельная внутренняя энергия жидкости с учетом изменения

температуры и давления;  $V$  — внутренний объем трубы,  $m^3$ ;  $G_A$ ,  $G_B$  — общие расходы энергии в трубе через порты  $A$  и  $B$ ;  $G_H$  — энергия передаваемой конвективной теплопередачи на стенке трубы;  $m_1$  — средний массовый расход воды между портами  $A$  и  $B$ ,  $kg/sec$ ,  $m_1 = (m_A + m_B)/2$ ;  $g$  — гравитационное ускорение,  $g = 9,81 m/c^2$ ;  $\Delta z$  — подъем по высоте от порта  $A$  к порту  $B$  (см. рис. 9, 10).

Результаты моделирования приведены на рис. 11 и в табл. 2.

Для математического моделирования рассматривалась составная часть системы с солнечными элементами в виде участка трубы длиной 1 метр и температурой воды на входе  $10^\circ C$ . Нижняя часть КСУ, где поступал теплоноситель, холоднее, чем в области выхода теплоносителя. В связи с этим следует выбрать такой расход, чтобы максимальная температура на поверхности фотоэлементов по всей длине КСУ не превышала  $25^\circ C$ . Как следует из результатов параметрического моделирования (см. табл. 2), теоретически достаточно прокачать  $0,5$  л/мин воды для одного сегмента (см. рис. 8, 9), чтобы поддерживать температуру СЭ на уровне  $25^\circ C$ . При этом очевидно, что применение параллельных тепловых абсорберов «лист – труба» под голографическим элементом нерационально за счет меньшей степени прогрева воды. Использование теплового абсорбера «лист – труба» только под СЭ позволит уменьшить вес.

В рассмотренных граничных условиях для КСУ с тремя тепловыми абсорберами расход воды для поддержания КПД СЭ на максимальном уровне составил от  $1,5$  до  $3$  л/мин. Результаты математического моделирования в виде трехмерной области параметров даны на рис. 10.

Таблица 2

**Зависимость температуры фотovoltaического преобразователя солнечного модуля от объема прокачиваемого теплоносителя при  $CP 1000$  Вт/ $m^2$  (температура воды на входе (порт  $A$ )  $10^\circ C$ )**

Расход, л/мин	Температура, $^\circ C$		
	на поверхности СЭ	на выходе	окружающей среды
0,20	37,85	23,925	25
0,50	17,35	13,675	25
0,80	15,35	12,675	25
1,00	14,05	12,025	25
1,00	14,35	12,175	30
1,00	14,65	12,325	35
1,00	15,25	12,625	40
1,00	15,55	12,775	45
0,80	17,55	13,775	45
0,50	20,35	15,175	45
0,20	31,35	20,675	45
0,12	39,85	24,925	45

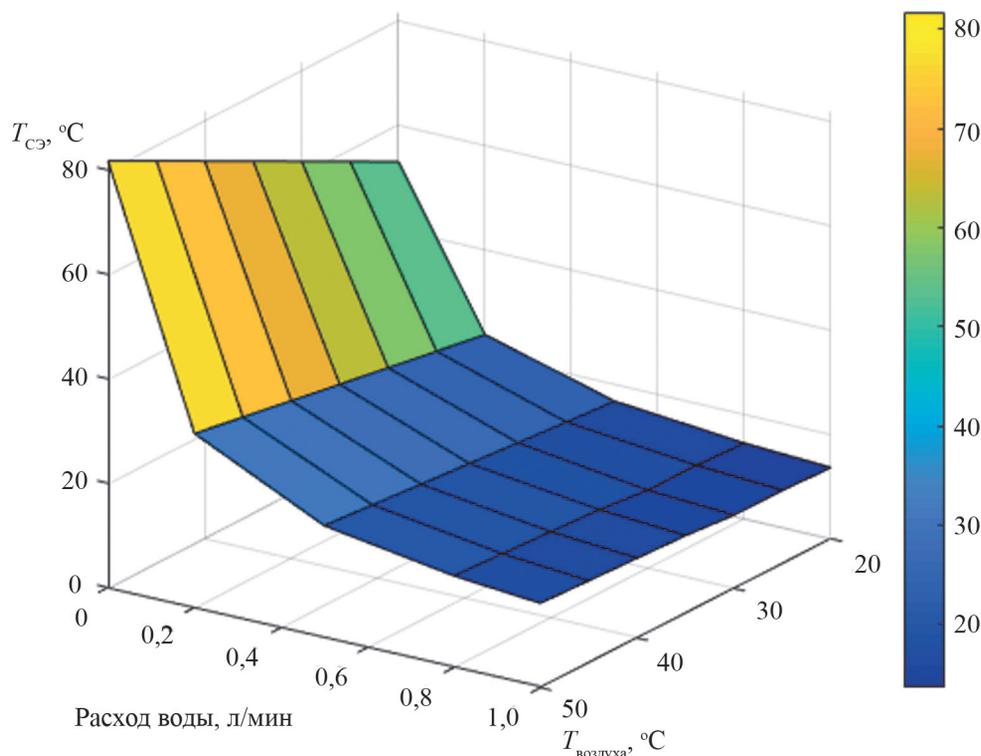


Рис. 10. Зависимость температуры ГСУ от водяного охлаждения

### Заключение

Использование голографических концентраторов вызывает рост температуры поверхности фотоэлектрических панелей, который приводит к относительно небольшому снижению КПД фотопреобразования.

Восстановление КПД может быть достигнуто охлаждением панелей, которое уменьшит термический износ материала фотоэлементов и позволит использовать охлаждающую жидкость в системах тепло- и горячего водоснабжения. Как показывают тепловые характеристики солнечного модуля с голографическим концентратором, рабочая температура фотопреобразователей при хорошем приходе СР и высокой температуре окружающей среды может быть более 45 °С, что ведет к уменьшению КПД фотоэлементов более чем на 4% от максимального значения. При использовании системы охлаждения [6, 13] и правильном регулировании теплоносителя на каждом 1 м<sup>2</sup> установки можно получить до 50 литров воды с температурой до 35 °С. Учитывая требования СНиПов и ГОСТов, нормы подачи горячей воды должны быть следующими:

### Литература

1. Малюгин С.А. Повышение эффективности использования солнечной энергии в автономных системах энергоснабжения // Наука ЮрГУ: Материалы 66 науч. конф. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. С. 1348—1353.

- не менее 60° для системы открытого теплоснабжения;

- не менее 50° в системе закрытого теплоснабжения;
- не выше 75° градусов независимо от вида системы.

Это значит, что охлаждающая вода ФЭП может использоваться в качестве предварительного нагрева воды для систем отопления и горячего водоснабжения с применением солнечных коллекторов [16].

Эффективность подготовки горячей воды повысится, если к выходу трубки охладителей солнечного модуля с голографическим концентратором подключить солнечный коллектор (СК) (см. рис. 8).

Таким образом, использование системы охлаждения позволит одновременно сохранить срок службы фотоэлементов, поддержать их выработку на максимальном уровне и обеспечить потребителя горячей водой. Предложенную конструкцию солнечного модуля с голографическим концентратором следует использовать для энергоснабжения потребителей с комбинацией солнечных коллекторов.

### References

1. Malyugin S.A. Povyshenie Effektivnosti Ispol'zovaniya Solnechnoy Energii v Avtonomnyh Sistemah Energosnabzheniya. Nauka YUrGU: Materialy 66 Nauch. Konf. Chelyabinsk: Izdat. tsentr YUUrGU, 2014: 1348—1353. (in Russian).

2. Пат. 2012115231/28 РФ. Солнечная фотоэлектрическая батарея / Виссарионов В.И., Бавин М.Р. // Бюл. изобрет. 2012. № 19.
3. Пат. 09/322.781 USA. Device for concentrating Optical Radiation.
4. Бавин М.Р. Разработка и исследование преломляющих фотоэлектрических установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2014.
5. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007.
6. Sayegh M.A. e. a. Heat Pump Placement, Connection and Operational Modes in European District Heating // Energy and Buildings. 2018. V. 166. Pp. 122—144.
7. MathWorks Simscape [Электрон. ресурс] <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (дата обращения 16.02.2019).
8. Муминов Р.А., Турсунов М.Н., Тукфатуллин О.Ф. Влияние температуры на вольтамперные характеристики фотоэлектрических батарей на базе монокристаллического кремния // Гелиотехника. 2007. № 4. С. 21—24.
9. Castillo-Aguilella J.E. Non Imaging Applications of Volume Diffractive Optics Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate College the University of Arizona [Электрон. ресурс] [http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/238648/1/azu\\_etd\\_12258\\_sip1\\_m.pdf](http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/238648/1/azu_etd_12258_sip1_m.pdf) (дата обращения 16.02.2019).
10. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: a Review of Efficiency/Power Correlations Science Direct // Solar Energy. 2009. V. 83. Iss. 5. Pp. 614—624.
11. Джумаев А.Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции // Технические науки — от теории к практике: Сборник статей по материалам XLVI Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2015. № 5 (42). С. 33—40.
12. Ёе Вин, Виссарионов В.И. Исследование влияния температуры на характеристики фотоэлектрических преобразователей // Научно-техническое творчество молодежи — путь к обществу, основанному на знаниях: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2012. С. 486—488.
13. Iurevych O., Gubin S., Dudeck M. Combined Receiver of Solar Radiation with Holographic Planar Concentrator // Electrical Eng. Research. 2013. V. 1. Iss. 2. Pp. 35—41.
14. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: Издат. дом МЭИ, 2008.
15. Гулямов Г., Шарипбаев Н.Ю. Влияние температуры на ширину запрещенной зоны полупроводника // Физическая инженерия поверхности. 2011. Т. 9. № 1. С. 40—43.
16. Dietrich B., Balkowski M. RWE Bau-Handbuch. 13 Ausgabe. Frankfurt-Berlin-Heidelberg: VWEW Energieverlag GmbH, 2004.
2. Pat. 2012115231/28 RF. Solnechnaya fotoelektricheskaya batareya. Vissarionov V.I., Bavin M.R. Byul. izobret. 2012;19. (in Russian).
3. Pat. 09/322.781 USA. Device for Concentrating Optical Radiation.
4. Bavin M.R. Razrabotka i Issledovanie Prelomlyayushchih Fotoelektricheskikh Ustanovok: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NIU «MEI», 2014. (in Russian).
5. Strebkov D.S., Tver'yanovich E.V. Kontsentratory Solnechnogo Izlucheniya M.: GNU VIESKH, 2007. (in Russian).
6. Sayegh M.A. e. a. Heat Pump Placement, Connection and Operational Modes in European District Heating. Energy and Buildings. 2018;166:122—144.
7. MathWorks Simscape [Elektron. Resurs] <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (Data Obrashcheniya 16.02.2019).
8. Muminov R.A., Tursunov M.N., Tukfatullin O.F. Vliyanie Temperatury na Volt'tampernye Harakteristiki Fotoelektricheskikh Batarey na Baze Monokristallicheskogo Kremniya. Geliotekhnika. 2007;4:21—24. (in Russian).
9. Castillo-Aguilella J.E. Non Imaging Applications of Volume Diffractive Optics Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate College the University of Arizona [Elektron. Resurs] [http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/238648/1/azu\\_etd\\_12258\\_sip1\\_m.pdf](http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/238648/1/azu_etd_12258_sip1_m.pdf) (Data Obrashcheniya 16.02.2019).
10. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: a Review of Efficiency/Power Correlations Science Direct. Solar Energy. 2009;83;5:614—624.
11. Dzhumaev A.Ya. Analiz Vliyaniya Temperatury na Rabochiy Rezhim Fotoelektricheskoy Solnechnoy Stan-tsii. Tekhnicheskije Nauki — ot Teorii k Praktike: Sbornik Statey po Materialam XLVI Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Novosibirsk: SibAK, 2015;5 (42):33—40. (in Russian).
12. Ye Vin, Vissarionov V.I. Issledovanie Vliyaniya Temperatury na Harakteristiki Fotoelektricheskikh Preobrazovateley. Nauchno-tekhnicheskoe Tvorchestvo Molodezhi — Put' k Obshestvu, Osnovannomu na Znaniyah: Materialy IV Mezhdunar. Nauch.-pakt. Konf. M., 2012: 486—488. (in Russian).
13. Iurevych O., Gubin S., Dudeck M. Combined Receiver of Solar Radiation with Holographic Planar Concentrator. Electrical Eng. Research. 2013;1;2:35—41.
14. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. Solnechnaya Energetika. M.: Izdat. Dom MEI, 2008. (in Russian).
15. Gulyamov G., Sharibaev N.Yu. Vliyanie Temperatury na Shirinu Zapreshchennoy Zony Poluprovodnika. Fizicheskaya Inzheneriya Poverhnosti. 2011;9;1:40—43. (in Russian).
16. Dietrich B., Balkowski M. RWE Bau-Handbuch. 13 Ausgabe. Frankfurt-Berlin-Heidelberg: VWEW Energieverlag GmbH, 2004.

**Сведения об авторах:**

**Шохзода Бехрузи Талби** — аспирант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: Gaint90@mail.ru

**Тягунов Михаил Георгиевич** — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: mtyagunov@mail.ru

**Information about authors:**

**Shokhzoda Bekhruzi T.** — Ph.D.-student of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: Gaint90@mail.ru

**Tyagunov Mikhail G.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: e-mail: mtyagunov@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 16.03.2019

**The article received to the editor:** 16.03.2019