

Исследование характеристик экспериментальной солнечной установки для тепло- и электроснабжения потребителей

Рецензия эксперта на статью получена 10.07.2018 [Expert review on the article was received on July 10, 2018].

Разработка и создание теплофотоэлектрических (ТФЭ) модулей (PVT modules в иностранной транскрипции) в настоящее время является одним из важнейших направлений развития солнечной энергетики в мире [1–4]. Целью этих работ является повышение эффективности преобразования солнечной энергии, за счёт снижения потерь поступающей солнечной энергии и, в конечном счёте, снижения себестоимости получаемой энергии.

В настоящей работе рассмотрены новые теплофотоэлектрические модули, включающие фотоприёмники и концентраторы, обеспечивающие эффективное преобразование солнечной энергии в тепловую и электрическую.

Исследовано влияние природных условий эксплуатации комплекса, состоящего из теплофотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения, охлаждаемыми фотоэлектрическими преобразователями, закреплёнными на системе протока треугольного профиля, и следящей системой. Разработана и исследована солнечная когенерационная установка на основе комплекс из четырёх теплофотоэлектрических модулей на экспериментальном стенде ВИЭСХ (рис. 1).

В табл. 1 представлены теплоэнергетические параметры комплекса из двух модулей при природных испытаниях на стенде: E_c — мощность солнечного излучения, фиксируемая пиранометром «Пеленг СФ-6», Вт/м²; $t_{вх}$ и $t_{вых}$ — температуры

Исследовано влияние природных условий эксплуатации комплекса, состоящего из теплофотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения, охлаждаемыми фотоэлектрическими преобразователями, закреплёнными на системе протока треугольного профиля, и следящей системой

на входе и выходе системы протока воды с расходом m^* (отношение массы точного теплоносителя m [кг/ч] ко времени τ), °C; η_T — тепловой КПД (КПИ) исследуемых модулей, %; m^* — расход нагретой воды за восемь часов, кг/[м²·(8 ч)].

Геометрические размеры модуля задаются исходя из эффективности работы промышленно изготавливаемых фотопреобразователей с их минимальными размерами 6×3 см с концентраторами солнечного излучения с геометрической концентрацией K_T около десяти крат. Большие рабочие токи имеют большие потери в соединительных проводах. Тип и форма концентратора выбираются исходя из минимальной высоты модуля (35 см) при заданной концентрации — длина миделя концентратора (66 см), ширина (70 см) выбирается из количества последовательно соединённых фотопреобразователей (заданной величины рабочего напряжения — 12 В).

УДК 621.383

Исследование характеристик экспериментальной солнечной установки для тепло- и электроснабжения потребителей

В. А. Майоров, к.т.н.; **Л. Д. Сагинов**, к.т.н., Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

В настоящей работе представлены исследования солнечной когенерационной установки на основе теплофотоэлектрических модулей. Исследовано влияние природных условий эксплуатации комплекса, состоящего из теплофотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения, охлаждаемыми фотоэлектрическими преобразователями, закреплёнными на системе протока треугольного профиля и оборудованными следящей системой. Проведённые расчёты тепловых и фотоэлектрических характеристик фотоприёмников подтверждались экспериментальными натурными исследованиями. На основании приведённых сравнительных характеристик показано, что при применении концентраторов с более высоким оптическим КПД (с 0,6 до 0,8), применения эффективных (с КПД около 18–20 %) солнечных элементов устойчиво работающих при концентрированном излучении в пределах 10 крат и усовершенствованной технологии сборки разрабатываемых модулей и установок в целом относительно иностранных промышленно изготавливаемых гибридных модулей типа PVT-200M фирмы Wiodun имеет большую годовую выработку фотоэлектрической энергии в пределах 30 % и большую выработку тепловой энергии при 0,8 E_c (20 % облачности) в 1,7 раз. Это даёт основание для разработки установки на базе комплексов теплофотоэлектрических модулей, повышая общую эффективность за счёт улучшения технологии изготовления комплектующих (концентраторов, фотоприёмников, сборки, юстировки) предназначенной для снабжения электроэнергией, горячей водой и теплом автономных потребителей.

Ключевые слова: теплофотоэлектрические установки, выработка тепловой и фотоэлектрической энергии, натурные исследования, гибридные модули.

UDC 621.383

Investigation of characteristics of experimental solar installation for heat and electrical supply of consumers

V. A. Mayorov, PhD; **L. D. Saginov**, PhD, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM" (FSBSI FSAEC VIM)

In this paper, studies of a solar cogeneration unit based on thermal-photo-electric modules are presented. The effect of full-scale operating conditions of a complex consisting of heat-and-photoelectric modules with solar concentrators cooled by photoelectric converters fixed on a triangular duct system and equipped with a tracking system was investigated. The calculations of the thermal and photoelectric characteristics of the photodetectors have been confirmed by experimental field studies. On the basis of the above comparative characteristics it's shown that when using concentrators with a higher optical efficiency (from 0.6 to 0.8), using effective solar cells (with an efficiency of approximately 18–20 %) operating steadily with concentrated radiation within 10 times and The advanced technology of assembly of the developed modules and installations in general with respect to foreign commercially available hybrid modules such as PVT-200M from Wiodun has a large annual generation of photoelectric energy in the range of 30 % and a large output Thermal energy at 0.8 E_s (20 % cloudiness) in 1.7 times. This gives the basis for the development of an installation based on thermal-photo-electric modules, increasing overall efficiency by improving the technology of manufacturing components (concentrators, photodetectors, assembling, alignment) designed to supply electricity, hot water and heat to autonomous consumers.

Keywords: heat and photoelectric installations, generation of thermal and photoelectric energy, field studies, hybrid modules.



Рис. 1. Солнечная когенерационная установка на основе четырёх теплофотозлектрических модулей

Выбранные габаритные размеры позволяют изготавливать модули без сложных приспособлений при изготовлении комплектующих деталей, выбирая материалы, обладающие минимальным весом и стоимостью, и несложными способами крепежа, обеспечивая надёжность и способность к юстировке фотоприёмника относительно фокусирующего солнечного излучения от концентратора при эксплуатации [5, 6].

В табл. 2 представлены теплоэнергетические параметры комплекса из четырёх теплофотозлектрических модулей при натурных испытаниях на стенде ВИЭСХ.

Энергия нагрева теплоносителя определяется в соответствии с разработанной формулой [7]:

$$Q = mc \left(\frac{\lambda}{\eta} \right)_{t_{\text{вх}}} (t - t_{\text{вх}}), \quad (1)$$

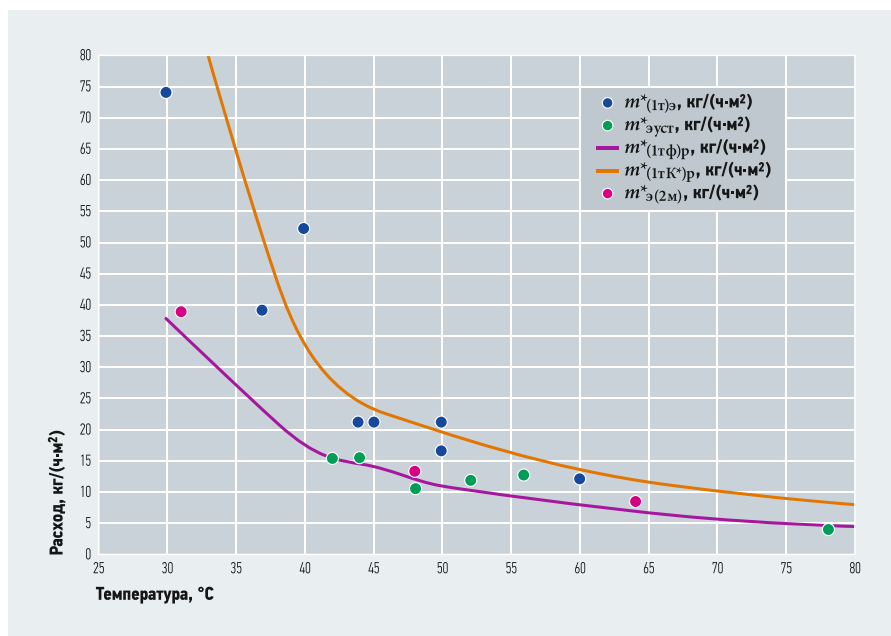


Рис. 2. Расчётные и экспериментальные зависимости расхода от выходной температуры нагрева воды при различном количестве модулей

Теплоэнергетические параметры комплекса из двух модулей*1

$E_c, \text{ Вт/м}^2$	$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$m^*, \text{ кг/ч}$	$\eta_{т}, \%$	$m^*, \text{ кг/[м}^2 \cdot (8 \text{ ч})]$
876	23	31	36	46	312
861	28	64	7,6	44	66
801	28	48	12	42	104

*1 При натурных испытаниях на стенде ВИЭСХ.

Теплоэнергетические параметры комплекса*2

$E_c, \text{ Вт/м}^2$	$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$m^*, \text{ кг/ч}$	$\eta_{т}, \%$	$m^*, \text{ кг/[м}^2 \cdot (8 \text{ ч})]$
921	20	52	22,6	49	98
921	20	78	8,0	32	35
921	20	56	24,0	59	104
921	20	44	28,8	47	125
921	20	42	28,8	43	125
921	20	48	20,6	39	89

*2 Из четырёх ТФЗ-модулей при натурных испытаниях на стенде ВИЭСХ.

табл. 1

табл. 2

В модуле с параболоцилиндрическим концентратором и фотоприёмником с треугольным профилем с неравномерным распределением температуры нагрева теплоносителя по объёму расчётная модель должна учитывать эти факторы, а также учитывать свойства теплопроводности λ и динамической вязкости η , величины которых зависят от температуры t по профилю треугольного сечения системы протока.

Сравнительные расчётные и экспериментальные энергетические характеристики зависимости расхода от выходной температуры воды и параметры тепловых и теплофотозлектрических модулей и комплексов показаны на рис. 2.

Расчёт зависимости расхода от выходной температуры нагрева воды — проводился с учётом теплопроводности λ и динамической вязкости η теплоносителя при различных температурах нагрева теплоносителя по профилю треугольного сечения системы протока. Зависимость расхода от выходной температуры нагрева воды по профилю прямоугольного сечения системы протока рассчитывалась без учёта этих параметров [8,9]. При расчётах учитывались натурные условия — температура воздуха, скорость ветра.

Приведённые зависимости показывают, что эффективность разработанных модулей и их комплексов находится в пределах расчётных максимальной и минимальной эффективности единичных мо-

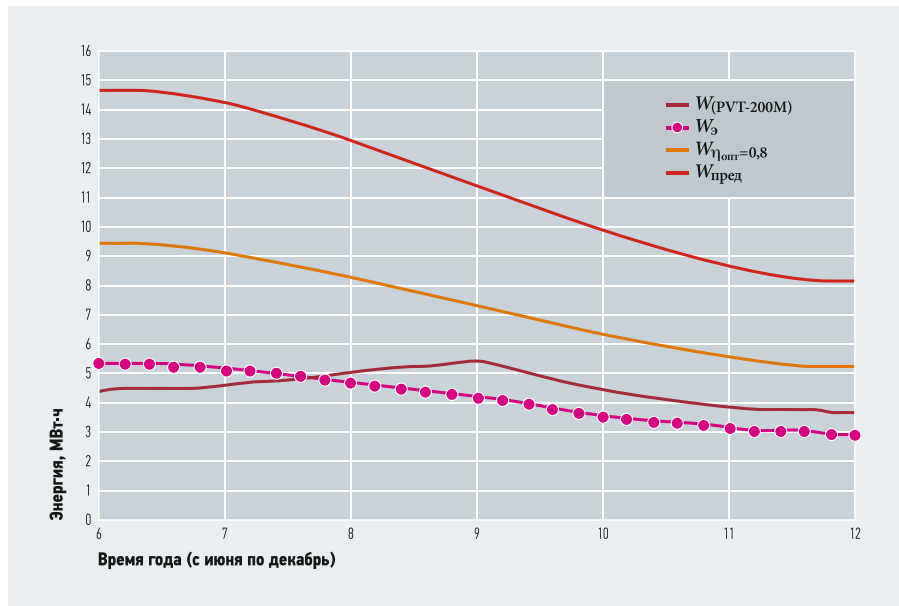


Рис. 4. Дневная выработка нагретой воды $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ (разница между температурами на входе и выходе) модулей в течение года на широте 45°

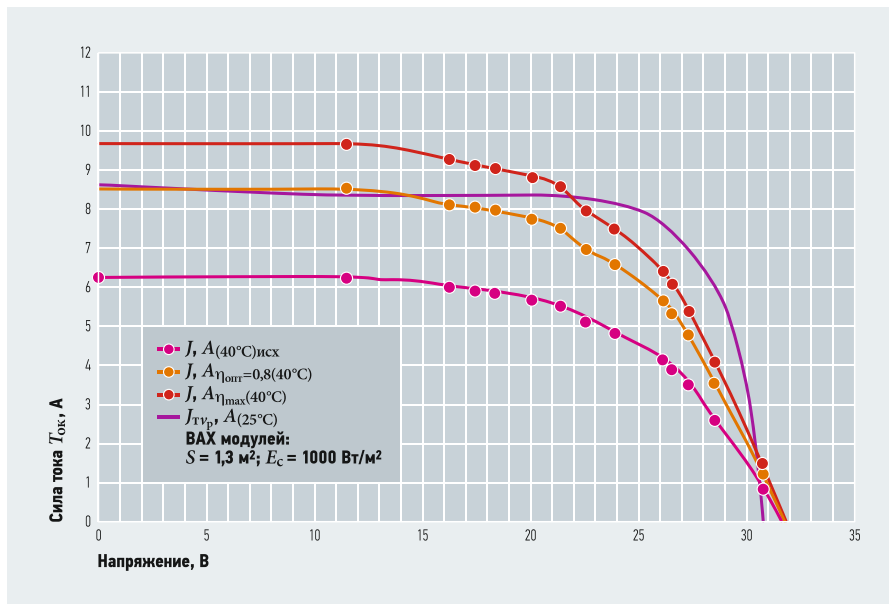


Рис. 3. Вольтамперные характеристики разрабатываемых ТФЭ и PVT-200M модулей

дулей. Это даёт основание для разработки установки на базе комплексов теплофотоэлектрических модулей с треугольным профилем сечения системы протока, позволяющая общую эффективность за счёт улучшения технологии изготовления комплектующих (концентраторов, фотоприёмников, сборки, юстировки).

Промышленно изготовленные модули типа TVP-200M фирмы Wiodun в представленных в проспектах технических характеристиках имеют предельное значение теплового КПД $\eta_0 = 60\%$, при габаритных размерах $830 \times 1400 \times 20$ мм, площади поверхности $S = 1,3 \text{ м}^2$, весом 24 кг. При стандартной солнечной освещённости $E_c = 1000 \text{ Вт/м}^2$ (АМ-1,5) предельное значение полезной тепловой мощности достигает $P_T = 810 \text{ Вт}$, при максимальной разнице между входной и выходной температур $\Delta t = 25^\circ\text{C}$.

Фотоэлектрические параметры данного модуля PVT-200M при стандартных условиях измерения, то есть при солнечной освещённости $E_c = 1000 \text{ Вт/м}^2$ (АМ-1,5) и температуре нагрева солнечных элементов $t_{C3} = 25^\circ\text{C}$, и экспериментальных модулей (с перерасчётом вольтамперной характеристики в соответствии с площадью модуля PVT-200M) при различных геометрических концентрациях K_T представлены в табл. 3.

Вольтамперные характеристики представлены на рис. 3.

Фотоэлектрические параметры модулей

Концентрация K_T	Экспериментальный модуль СЗ при $t_{C3} = 40^\circ\text{C}$			PVT-200M при $t_{C3} = 25^\circ\text{C}$
1	$\eta_{\text{мод}} = 15,9\%$	$\eta_{\text{мод}} = 15,9\%$	$\eta_{\text{мод}} = 18\%$	$\eta_{\text{PVT}} = 15\%$
10	$\eta_{\text{опт}} = 0,59$	$\eta_{\text{опт}} = 0,8$	$\eta_{\text{опт}} = 0,8$	
10	$\eta_{\text{мод}} = 9,16\%$	$\eta_{\text{мод}} = 12,4\%$	$\eta_{\text{мод}} = 14,1\%$	

табл. 3

Приведённые параметры показывают, что при увеличении оптического КПД до $\eta_{\text{опт}} = 0,8$ КПД модуля $\eta_{\text{мод}} = 18\%$ при однократном солнечном излучении и КПД модуля $\eta_{\text{мод}} = 14,1\%$ при концентрированном излучении фотоэлектрические параметры разрабатываемых модулей практически совпадают с PVT-модулями.

Разрабатываемые солнечные модули концентрированного излучения для теплофотоэлектрических модулей с системой слежения по отношению к PVT-модулям стационарного типа имеют большую выработку энергии за счёт потока солнечной энергии падающего перпендикулярно на мидель концентратора в течение рабочего дня [10].

Выработку энергии солнечной батареей можно определять в соответствии с формулой:

$$W = E_c \eta_{\text{опт}} \cos(\varphi) S_T. \quad (2)$$

Приведённые зависимости, представленные на рис. 4, характеризуют выработку нагретой воды соответственно итальянским и немецким PVT-модулями при условиях АМ-1,5 ($E_c = 1000 \text{ Вт/м}^2$), экспериментального модуля; модуля с концентратором с равномерным распределением солнечного излучения по поверхности фотоприёмника с оптическим КПД $\eta_{\text{опт}} = 0,6$; модуля с концентратором с равномерным распределением солнечного излучения по поверхности фотоприёмника с оптическим КПД $\eta_{\text{опт}} = 0,8$.

Расчётные и экспериментальные характеристики, представленные на рис. 5, показывают, что при КПД солнечных модулей (СМ) $\eta_{\text{см}} \approx 18\text{--}20\%$ и $\eta_{\text{опт}} \approx 0,8$ разрабатываемых модулей в условиях 20% облачности годовая выработка электроэнергии относительно стационарных PVT-модулей может быть увеличена до полутора раз.

На основании приведённых характеристик видно, что при коэффициенте полезного действия фотоприёмника $\eta_{\text{фп}} \approx 18\text{--}20\%$ и оптического КПД $\eta_{\text{опт}} \approx 0,8$ разрабатываемых модулей и системы слежения в условиях 20% облачности годовая выработка электроэнергии относительно стационарных PVT-модулей может быть увеличена до полутора раз.

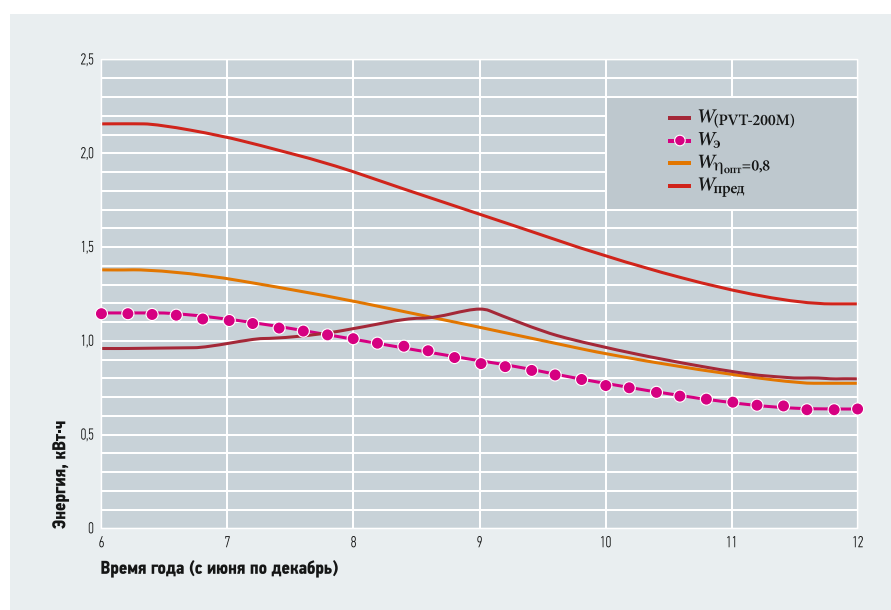


Рис. 5. Дневная выработка электроэнергии различных модулей в течение года на широте 45°

Анализ приведённых сравнительных характеристик показал, что применение зеркальных концентраторов с более высоким оптическим КПД (с 0,6 до 0,8), эффективных солнечных элементов (с КПД около 18–20%), устойчиво работающих при концентрированном излучении в пределах десяти крат и усовершенствованной технологии сборки разрабатываемых модулей и установок относительно иностранных промышленно изготавливаемых гибридных модулей типа PVT-200M фирмы Wiodun имеет большую годовую выработку фотоэлектрической энергии в пределах 30% и большую выработку тепловой энергии при $0,8E_c$ (20% облачности) в 1,7 раз.

Выводы

Приведены результаты исследований фотоэлектрических и тепловых характеристик модулей с параболоцилиндрическим

Проведённые расчёты тепловых и фотоэлектрических характеристик фотоприёмников подтверждались экспериментальными натурными исследованиями. Проведённые исследования показали целесообразность применения системы протока с профилем треугольного сечения

концентратором и фотоприёмником с неравномерным распределением температуры нагрева теплоносителя по объёму с учётом зависимости теплопроводности и динамической вязкости от изменения температуры по профилю треугольного сечения системы протока.

ные теоретические и экспериментальные зависимости показывают, что эффективность комплексов разработанных модулей находится в пределах максимальной и минимальной эффективности отдельных единичных модулей.

На основании приведённых сравнительных характеристик видно, что при применении концентраторов с более высоким оптическим КПД (с 0,6 до 0,8), применении эффективных (с КПД около 18–20%) промышленно изготавливаемых солнечных элементов, устойчиво работающих при концентрированном излучении в пределах 10 крат, и усовершенствованной технологии сборки разрабатываемых модулей и установок в целом, относительно модуля типа PVT-200M, фирмы Wiodun, он имеет большую годовую выработку фотоэлектрической энергии до 30% и большую выработку тепловой энергии при $0,8E_c$ (20% облачности) в 1,7 раз. Это даёт основание для разработки установки на базе комплексов теплофотоэлектрических модулей, повышая общую эффективность за счёт улучшения технологии изготовления комплектующих (концентраторов, фотоприёмников, сборки, юстировки), предназначенной для снабжения электроэнергией, горячей водой и теплом автономных потребителей. ●

1. Mittelman G., Kribus A., Dayan A. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Energy Conversion and Management*. 2007. Vol. 48. Pp. 2481–2490.
2. Li M., Li G.L., Ji X., Yin F., Xu L. The performance analysis of the Trough Concentrating Solar Photovoltaic / Thermal system. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. Pp. 2378–2383.
3. Vossier A., Chemisana D., Flamant G., Dollet A. Very high fluxes for concentrating photovoltaic: Considerations from simple experiments and modeling. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 38. Pp. 31–39.
4. Renno C., Petito F. Energy Analysis of a Concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) System. *Energy Science and Technology*. 2013. Vol. 6. No. 2. Pp. 53–63.
5. Патент РФ №2543256, МПК F24J 2/10. Теплофотоэлектрический модуль с параболоцилиндрическим концентратором солнечного излучения / Майоров В.А. Заявл. 27.02.2015. Оpubл. 27.06.2015. Бюл. №8.
6. Патент РФ №2591747, МПК F24J 2/10. Теплофотоэлектрический модуль с параболоцилиндрическим концентратором солнечного излучения и способ его изготовления / Майоров В.А., Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М., Сагинов Л.Д., Трушевский С.Н. Заявл. 27.02.2015. Оpubл. 20.07.2016. Бюл. №20.
7. Майоров В.А. Исследования тепловых характеристик солнечного модуля с концентратором // *Энергетик*, 2016. №3. С. 22–27.
8. Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепло- и массообмен. *Теплотехнический эксперимент*. — М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
9. Майоров В.А., Сагинов Л.Д., Трушевский С.Н., Беленов А.Т. Экспериментальные исследования характеристик солнечного модуля концентрированного излучения в натуральных условиях // *Вестник ВИЭСХ*, 2016. №3. С. 105–112.
10. Майоров В.А., Сагинов Л.Д., Трушевский С.Н. Тепловые характеристики модуля с параболоцилиндрическим концентратором солнечного излучения // *Альтернативная энергетика и экология*, 2016. №19/20. С. 12–19.

References — see page 92.

Investigation of characteristics of experimental solar installation for heat and electrical supply of consumers. Pp. 72–75.

V. A. Mayorov, PhD; L. D. Saginov, PhD, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM" (FSBSI FSAEC VIM)

1. Mittelman G., Kribus A., Dayan A. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Energy Conversion and Management*. 2007. Vol. 48. Pp. 2481–2490.
2. Li M., Li G.L., Ji X., Yin F., Xu L. The performance analysis of the Trough Concentrating Solar Photovoltaic / Thermal system. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. Pp. 2378–2383.
3. Vossier A., Chemisana D., Flamant G., Dollet A. Very high fluxes for concentrating photovoltaic: Considerations from simple experiments and modeling. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 38. Pp. 31–39.
4. Renno C., Petitto F. Energy Analysis of a Concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) System. *Energy Science and Technology*. 2013. Vol. 6. No. 2. Pp. 53–63.
5. Patent of the Russian Federation No. 2543256, MPK F24J 2/10. *Teplofotoelektricheskij modul' s parabolocilindricheskim koncentratorom solnechnogo izlucheniya* [Thermoelectric photoelectric module with a parabolic-cylindrical solar concentrator]. Majorov V.A. Decl. on February 27, 2015. Publ. on June 27, 2015. Bul. No. 8.
6. Patent of the Russian Federation No. 2591747, MPK F24J 2/10. *Teplofotoelektricheskij modul' s parabolocilindricheskim koncentratorom solnechnogo izlucheniya i sposob ego izgotovleniya* [Thermoelectric photovoltaic module with a parabolic-cylindrical solar concentrator and it's manufacturing method]. Majorov V.A., Arbuzov Ju.D., Evdokimov V.M., Saginov L.D., Trushevskij S.N. Decl. on February 02, 2015. Publ. on July 20, 2016. Bul. No. 20.
7. Majorov V.A. *Issledovaniya teplovykh harakteristik solnechnogo modulya s koncentratorom* [Investigations of the thermal characteristics of the solar module with a concentrator]. *Jenergetik* [Power Engineer's Magazine]. 2016. No. 3. Pp. 22–27.
8. Grigor'ev V.A., Zorin V.M. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskij jeksperiment* [Heat and mass transfer. Thermotechnical experiment]. Moscow. *Jenergoizdat* [Publishing House of Power Industry]. 1982. 512 p.
9. Majorov V.A., Saginov L.D., Trushevskij S.N. Belenov A.T. *Jeksperimental'nye issledovaniya harakteristik solnechnogo modulya koncentririrovannogo izlucheniya v naturnykh usloviyakh* [Experimental studies of the characteristics of the solar module of concentrated radiation under natural conditions]. *Vestnik VJFeSH* [Bulletin of All-Russian Research Institute for the Electrification of Agriculture]. 2016. No. 3. Pp. 105–112.
10. Majorov V.A., Saginov L.D., Trushevskij S.N. *Teplovyje harakteristiki modulya s parabolocilindricheskim koncentratorom solnechnogo izlucheniya* [Thermal characteristics of a module with a parabolic-cylindrical concentrator of solar radiation]. *Al'ternativnaja jenergetika i jekologija* [Alternative energy and ecology]. 2016. No. 19/20. Pp. 12–19.