

# Экспериментальные исследования приемных поверхностей плоских солнечных коллекторов

\* В. В. Кувшинов<sup>a</sup>, \*\* Л. М. Абдали<sup>b</sup>, \*\*\* Н. В. Морозова<sup>a,c,g</sup>,  
\*\*\*\* Б. Л. Крит<sup>d,g</sup>, \*\*\*\*\* Ф. М. Аль-Руфай<sup>e</sup>, \*\*\*\*\* Х. А. Исса<sup>f</sup>

<sup>a</sup>ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
Институт ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, 299015, Россия,  
<sup>\*</sup>e-mail: [kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

<sup>b</sup>University of Kufa (Куфский университет),

г. Наджаф, 54001, Республика Ирак, <sup>\*\*</sup>e-mail: [laithm.abood@uokufa.edu.iq](mailto:laithm.abood@uokufa.edu.iq)

<sup>c</sup>Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования,  
г. Москва, 123993, Россия, <sup>\*\*\*</sup>e-mail: [innat.m@mail.ru](mailto:innat.m@mail.ru)

<sup>d</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 125993, Россия, <sup>\*\*\*\*</sup>e-mail: [bkrit@mail.ru](mailto:bkrit@mail.ru)

<sup>e</sup>Wasit university (Васитский университет),

г. Васит, 52000, Республика Ирак, <sup>\*\*\*\*\*</sup>e-mail: [laith\\_2210@mail.ru](mailto:laith_2210@mail.ru)

<sup>f</sup>University of Thi-Qar (Университет Ту-Кар),

г. Насирия, 64001, Республика Ирак, <sup>\*\*\*\*\*</sup>e-mail: [haeder.issa84@gmail.com](mailto:haeder.issa84@gmail.com)

<sup>g</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
г. Москва, 127055, Россия

Поступила в редакцию 15.08.2020

После доработки 01.09.2020

Принята к публикации 01.09.2020

Приведены исследования энергетических характеристик солнечного коллектора с селективной приемной поверхностью. При использовании специальных технологий нанесения высококачественных селективных покрытий на абсорберы гелиоколлекторов возможно значительно поднять коэффициент преобразования падающего потока солнечной радиации. Даны результаты исследований плоских гелиоколлекторов, служащих для нагрева теплоносителя, используемого в основном для нужд горячего водоснабжения индивидуальных потребителей. В проводимых экспериментах применены плоские солнечные коллекторы с абсорбером из меди и нержавеющей стали. Исследования показали, что более полно использовать возможности гелиоколлектора можно в зависимости от режима работы всей системы солнечного горячего водоснабжения. Исследования проведены сотрудниками кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета в Институте ядерной энергии и промышленности. Показано, что солнечные установки по прямому преобразованию потока излучения в тепловую энергию обладают значительным коэффициентом преобразования по сравнению с солнечными электрогенерирующими системами.

**Ключевые слова:** плоский солнечный коллектор, фотоэлектрический модуль, установка солнечного горячего водоснабжения, тепловой абсорбер, система солнечного теплоснабжения, бак-аккумулятор

УДК 620.91:620.92:621.383.51

DOI: 10.5281/zenodo.4456690

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время российские и зарубежные специалисты проявляют большой интерес к развитию нетрадиционной и возобновляемой энергетики. В частности, проводится исследование в области гелиотехники с целью использования солнечных водонагревательных установок [1]. Установки для прямого преобразования потока солнечной радиации в тепловую энергию значительно превосходят по своему коэффициенту полезного действия фотоэлектрические установки, служащие для преобразования солнечной энергии в электрический ток. Альтернативой могут служить только термофото-

электрические установки для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [2, 3]. Однако для нужд современных потребителей такие типы установок пока не используются в массовом порядке, и в основном на данном этапе жилые и нежилые строения оснащаются отдельно фотоэлектрическими модулями и тепловыми гелиосистемами для электро- и теплоснабжения. При этом солнечные тепловые установки применяются в большинстве случаев для обеспечения потребителей горячей водой и в меньшем количестве для нужд теплоснабжения [4–6].

В целях эффективной работы приемных поверхностей энергетических установок для

прямого преобразования потока солнечной радиации в тепловую энергию необходимо использовать абсорберы с высокой степенью поглощения. Это достигается при внедрении специальных технологий для нанесения светопоглощающих покрытий на основной элемент гелиоколлектора – поглощающую поверхность абсорбера. В настоящее время для нанесения селективных покрытий используются устаревшие технологии, при которых абсорберы имеют невысокие энергетические показатели и быстро деградируют. При внедрении в производство новых высокотехнологичных процессов преобразования потока солнечной радиации в тепловую энергию и значительно увеличить срок службы гелиоколлекторов.

В данной работе приводятся результаты тестирования гелиоколлекторов, служащих для нагрева теплоносителя, используемого в основном для нужд горячего водоснабжения автономных индивидуальных потребителей [7]. На данный момент используются два основных типа установок с плоскими или вакуумными солнечными коллекторами. При этом плоские гелиоколлекторы имеют значительное разнообразие собственных конструкций, а их абсорберы изготавливаются из разных материалов [8]. Установки производятся различными частными компаниями, при этом фирмы высоко оценивают характеристики своих устройств, что зачастую не совсем верно. Проведенные на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» (ВИЭСС) Севастопольского государственного университета (СевГУ) в Институте ядерной энергии и промышленности исследования позволят более полно использовать возможности того или иного гелиоколлектора в зависимости от режима работы всей системы солнечного горячего водоснабжения, а также указать направления их конструктивного улучшения для повышения эффективности работы солнечных водонагревательных установок [9–10].

#### ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на схожесть всех гелиоустановок, каждая из них обладает рядом отличительных признаков. Гелиоколлектор, который был исследован в ходе работы, можно использовать как для систем горячего водоснабжения, так и для систем отопления зданий [11].

Для достижения поставленной цели был протестирован такой важный элемент гелиоколлектора, как абсорбер, и оценено его влияние на

характеристики работы водонагревательной установки [12].

Для исследований был выбран гелиоколлектор с абсорбером из меди. Этот абсорбер имеет селективное покрытие и состоит из приемной поверхности (лист меди) и медных трубок. Эти коллекторы имеют малый объем проточной части из-за небольшого количества трубок. Однако за счет хорошей теплопроводности меди и малого диаметра трубок (порядка 10 мм), хорошей теплоизоляции температура теплоносителя на выходе может достигать 70°C [13].

Исследования проводились на базе кафедры ВИЭСС на открытой территории. Теплоносителем в гелиоколлекторе являлась пресная вода. Главной целью данного исследования было получение зависимостей изменения выходной мощности и коэффициента преобразования гелиоколлектора от времени суток и температур теплоносителя на входе и выходе из системы [14]. Испытания проводились в ясные солнечные дни при максимальном значении прямой солнечной радиации (около 1000 Вт/м<sup>2</sup>) в мае и июне. Эти месяцы были выбраны не случайно: май является для Крыма месяцем с наибольшей солнечной активностью, то есть он характеризуется большим количеством солнечных дней и повышенной солнечной радиацией. Июнь – месяц с наибольшим поступлением солнечного излучения в сутки на единицу площади (Вт/м<sup>2</sup>) за счет максимального времени светимости солнца (самые длинные дни и короткие ночи) [15].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуя расход теплоносителя в зависимости от времени в период наблюдения, нами были установлены этапы выхода на номинальный режим работы солнечного коллектора. С 10:00 до 10:15 происходит первичный нагрев теплоносителя, а затем в течение часа с 10:15 до 11:15 устанавливается номинальный режим работы. То есть гелиоколлектор вышел на номинальный режим за 1 час 15 минут, что явилось хорошим показателем даже для июня месяца. На графике (рис. 1) приведена зависимость полезной мощности гелиоустановки от времени суток.

Мощность солнечной энергии, преобразованная гелиоколлектором, резко повысилась в первые 15 минут работы, а к 11:15 вышла на пиковый режим.

График на рис. 2 показывает зависимость коэффициента преобразования коллектора от времени. На нем мы ясно видим, что этот коэффициент у коллектора изменяется так же, как и полезная мощность. То есть максимум

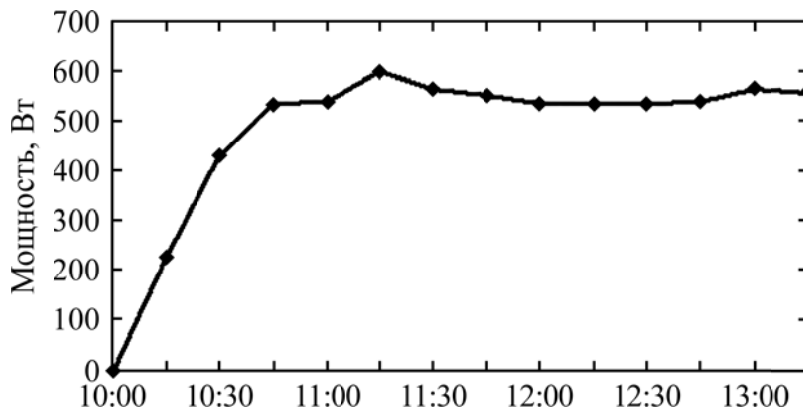


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от времени.

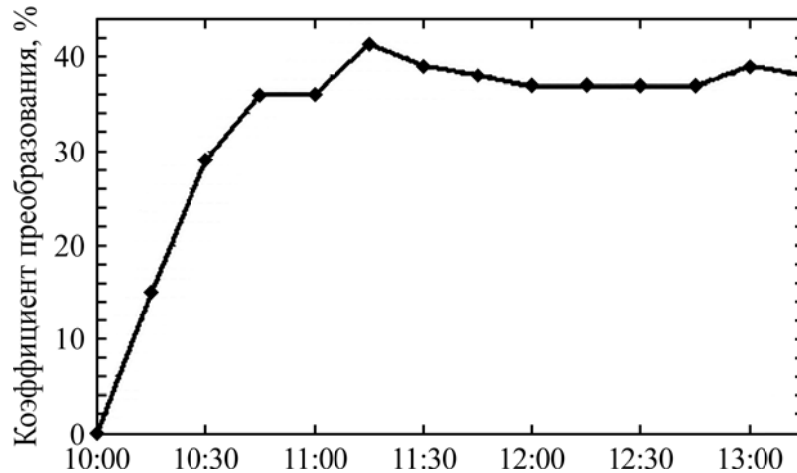


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования от времени.

Таблица. Температуры на трубках солнечного коллектора (за период: 10:00–13:30)

Время суток	Термодатчики									
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T 9	T 10
10:00	24,3	53,8	53,4	53,8	44,6	43,9	44,1	55,2	53,6	23,8
10:15	30,7	59,3	58,1	58,3	48,8	47,8	44,9	59,2	58,1	23,6
10:30	37,9	62	60,6	60,7	50,3	49,7	44,7	57,1	61,3	23,8
10:45	45,6	55,6	54,3	54,9	46,6	45,6	44,5	58,6	52,8	24,2
11:00	50,1	56,3	55,6	56,3	47,6	46,9	47	60	54,4	25,3
11:15	50,9	57,4	57,1	58,1	49,1	49	44,2	63,3	56,5	29,1
11:30	51,1	60,3	60	61,1	52,3	52,5	54,8	67	59,8	34,5
11:45	51,8	64,2	64	64,9	56,2	56,5	54,4	70,8	63,8	40
12:00	54,7	68,1	67,6	70,6	60,3	60,6	64,8	72,1	67,7	45,4
12:15	57	69,4	69,1	73,3	61,6	62,1	64,4	71,9	69,3	47,1
12:30	53,6	68,7	68,2	77	61,5	62,3	70	72,1	69,5	48,2
12:45	57,2	69,3	69,2	79,6	62,1	63	71,4	72,9	69,8	48,2
13:00	60	70,3	72,1	86	62,7	65,3	81,4	75,2	74,4	49
13:15	61,6	72	76,2	89,6	62,7	68,4	81,8	77,8	75,8	51,3

Все параметры получены при атмосферной температуре 24°C и освещенности 820 Вт/м<sup>2</sup>. Измерения проводились в июне при стандартных условиях, значение атмосферной массы  $\lambda_M 1,5$  (соответствует 45° с. ш., г. Севастополь).

приходиться на 11:15, то есть на время выхода коллектора на номинальный режим.

Из зависимостей температур теплоносителя на входе и выходе из гелиоколлектора (см. таблицу, показания 10-го и 9-го термодатчиков) мы можем исследовать температурный режим работы системы, а также разность температур на входе и выходе.

Из анализа всех графиков и таблицы можно сделать вывод, что для данного коллектора оптимальными температурами теплоносителя на выходе являются температуры в пределах 60–70°C, при этом разность температур ( $\Delta T$ ) изменяется от 30 до 50°C.

При постоянном отборе теплоносителя снижение коэффициента преобразования (после

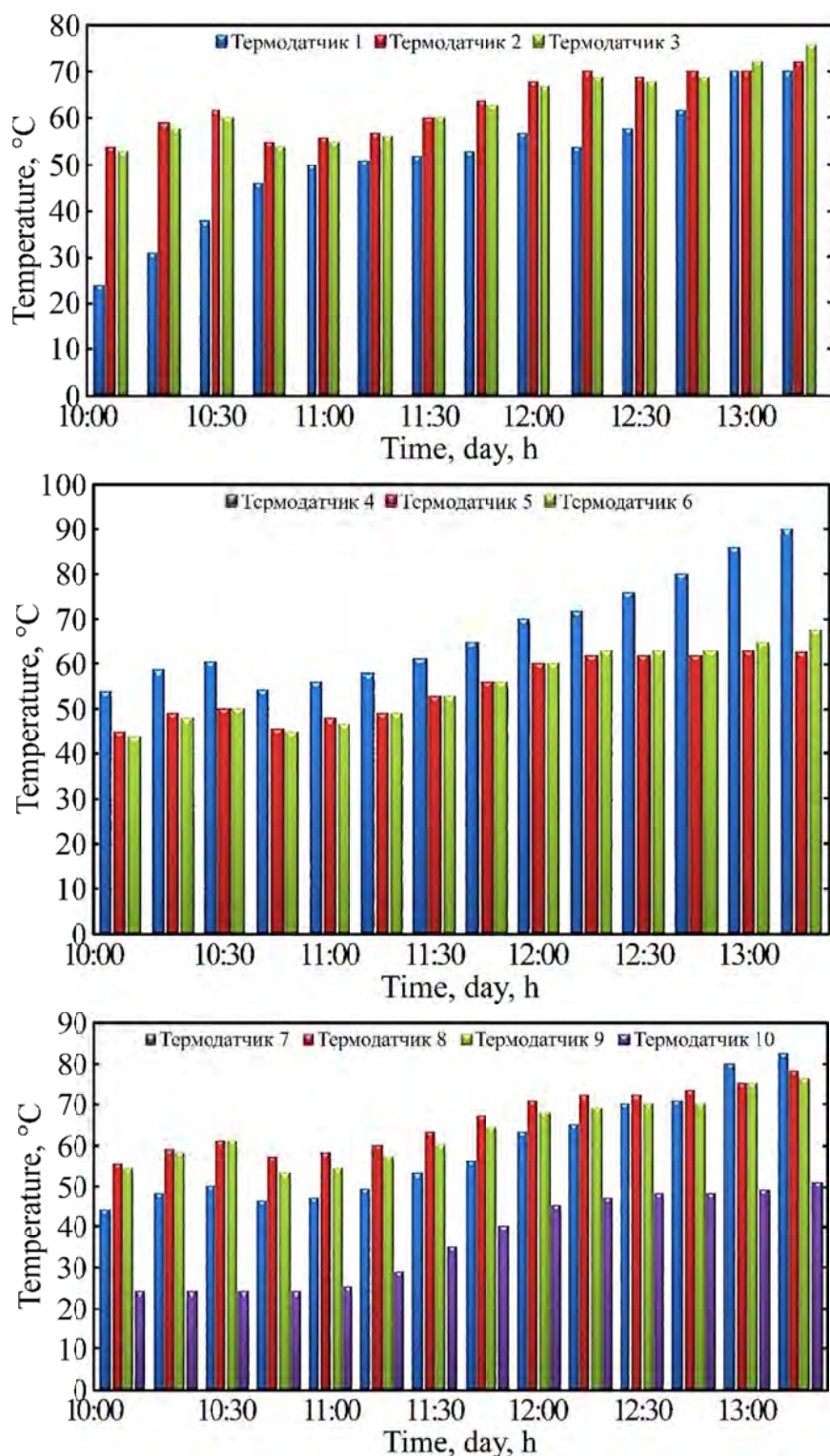


Рис. 3. Изменение температуры трубок от времени.

11:15 на рис. 2) наблюдаться не будет. При этом выходная мощность коллектора может составлять 500–600 Вт (см. график на рис. 1), а температура теплоносителя на выходе достигать 70°C.

Также интересной является полученная нами зависимость распределения температур на трубках гелиоколлектора от времени (таблица и рис. 3). Установка термодатчиков показана на рис. 4. По измерениям температур можно судить о характеристиках абсорбера.

На рис. 4 мы видим внешний вид коллектора. Абсорбер и трубки изготовлены из меди. Вся конструкция представляет собой тип «труба в трубе», площадь абсорбера 1,45 м<sup>2</sup>.

Как было сказано выше, температура на выходе из коллектора составляет 60–70°C, что делает возможным применение солнечных коллекторов данного типа для системы отопления индивидуальных потребителей, например на Южном берегу Крыма.

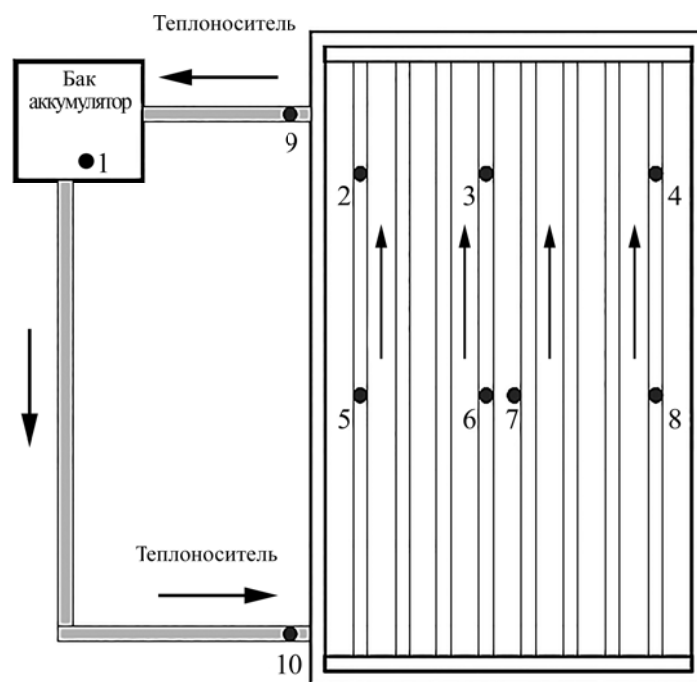


Рис. 4. Солнечный коллектор. Схема расположения термоматчиков.

Однако не очень удачным в конструкции коллектора (рис. 4) является то, что теплоноситель в дальних трубках абсорбера (термоматчики 4 и 8) проходит больший путь, чем в ближних (термоматчики 2 и 5). Этим объясняется разность температур на трубках (см. диаграммы на рис. 3). Тем не менее гелиоколлектор, который был описан выше, зарекомендовал себя как достаточно качественная установка, имеющая высокие показатели.

Проведенные исследования показали, что кроме горячего водоснабжения в осенне-весенний и летний периоды вышеописанная система может использоваться и для отопления. Для этого надо увеличить приемную площадь солнечного коллектора. Основой для гелиополя подобного типа могут служить описанные нами в статье гелиоколлекторы, которые производятся различными фирмами. Причем абсорбер из приемной поверхности – листа меди толщиной 0,5 мм и медных трубок малого диаметра 10 мм является эффективной системой для нагрева воды в весенне-осенний период до достаточно высоких температур (порядка 60–70°C).

Использование вышеописанных установок для теплообеспечения индивидуальных потребителей позволяет снизить использование природного газа и другого органического топлива, а также существенно сократить вредные выбросы в атмосферу, образующиеся в результате сгорания различных видов топлива.

При этом гелиоколлекторы могут иметь достаточно долгий срок службы (при хорошем качестве исполнения их срок службы сравним со сроком службы водяных труб и батарей системы

отопления в индивидуальных жилых домах). Цены на сами коллекторы также сравнительно небольшие. Все это позволяет сделать вышеописанные системы конкурентоспособными на рынке теплооборудования.

Приведенные экспериментальные данные показали, что:

- системы, использующие солнечное излучение для нагрева воды в условиях Крыма и Севастополя, имеют реальный коэффициент преобразования около 40% (при рекламируемых 60%) и температуру на выходе из системы 70°C (при рекламируемых 90°C);

- эти системы способны преобразовывать за сутки с одного квадратного метра гелиополя до 20 тыс. кДж тепла летом, 6–8 тыс. кДж в весенне-осенний период и до 4 тыс. кДж зимой;

- системы позволяют при увеличении гелиополя до 100 м<sup>2</sup> за один месяц экономить до 800 кг условного топлива в весенний период и до 2000 кг – летом.

Хотя реальные характеристики представленного гелиоколлектора при проведении натуральных испытаний бывают обычно немного ниже заявляемых производителем, тем не менее они способствуют внедрению в нашу жизнь и повседневный быт экологически чистых систем теплообеспечения, использующих в качестве источника энергии солнечное излучение, при этом они также значительно экономят органическое топливо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

– Солнечные установки по прямому преобразованию потока излучения в тепловую энергию обладают значительным коэффициентом преобразования по сравнению с солнечными электрогенерирующими системами, для нужд теплоснабжения их применение оправдано как с точки зрения энергетики, так и экономически.

– Системы солнечного теплоснабжения используются частными потребителями в большинстве случаев для нагрева горячей воды, при этом плоские солнечные коллекторы позволяют получать температуру 50–60°C, обладая значительной эффективностью работы, поэтому для установок солнечного горячего водоснабжения их применение обосновано и позволяет при определенных режимах иметь высокие энергетические показатели.

– При использовании специальных высокоточных технологий для обработки приемных поверхностей абсорберов гелиоустановок можно значительно поднять их коэффициент преобразования, эффективность использования и увеличить срок эксплуатации.

– Гелиоустановки можно использовать во многих южных районах Российской Федерации, поэтому для обеспечения автономных потребителей горячей водой с их помощью возможно значительно сэкономить органическое топливо, сократить вредные выбросы и улучшить в целом экологическую обстановку в регионах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллег из Института ядерной энергии и промышленности (СевГУ) и университета г. Куфы (Республика Ирак) за их постоянную поддержку.

#### ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank my colleagues at the Institute of Nuclear Energy and Industry (SevSU) and university of Kufa for their continuous support.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kuznetsov P.N., Abd Ali L.M., Kuvshinov V.V., Issa H.A. et al. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading, *J. Appl. Eng. Sci.*, 2020, vol. 18, no. 3, p. 194. doi: 10.5937/jaes18-24460.
2. Усков А.Е. Определение оптимальной группы потребителей для электроснабжения с использованием ветро-солнечных электростанций. *Вестник Донского государственного технического университета*, 2018. т. 18, № 1, с. 118.
3. Амерханов Р.А., Бекиров Э.А., Асанов М.М. Методы оптимизации работы теплоэлектростанции при совместной генерации с ветро- и солнечной электростанциями. *Строительство и техногенная безопасность*, 2019, № 14, с. 93.
4. Kuvshinov V.V., Al-Rufae F.M. The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 252. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040066>.
5. Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. et al. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 229. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1904008X>.
6. Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A., Lyamina N.V. et al. Some Results of a Study of Wave Energy Converters at Sevastopol State University, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 256. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040029>.
7. Kuvshinov V.V., Kolomyichenko V.P., Kakushkina E.G. et al. Storage System for Solar Plants, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, p. 153. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.
8. Layth Mohammed, Abd Ali, Haider Ahmed, Mohmmmed and Husam Abdulhusein, Wahhab, A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, p. 3666. <https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673>.
9. Guryev V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. et al. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: the Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 242. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040042>.
10. Abd Ali L.M., Ahmed Mohmmmed H., and Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, p. 3698. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.3698.3706>.
11. Kuvshinov V.V., Abd Ali L.M., Kakushina E.G. et al. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 223. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040054>.
12. Abd Ali L.M. and Issa H.A. Hybrid power generation using solar and wind energy, *Molod. Uchen.*, 2018, no. 7, p. 19. <https://moluch.ru/archive/193/48444>.
13. Abd Ali, L.M., Al-Rufae, F.M., Kuvshinov, V.V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex, *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, p. 284. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
14. Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. et al. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency

in Water Supply to Northern Crimea, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 260. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>.

15. Abdali, L.M., Kuvshinov, V.V., Bekirov, E.A. and Al-Rufae, F.M., Development of the Simulation and Control System for an Integrated Solar Energy Generation and Storage, *Construction and industrial safety*, Simferopol, Russia, 2020, vol. 18, no. 70, p. 133. <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-18-133-142>

### Summary

This paper presents the results of the studies of the energy characteristics of a solar collector with a selective receiving surface. When using special technologies for applying high-quality selective coatings to absorbers of solar collectors, it is possible to significantly increase the conversion coefficient of the incident solar radiation flux. The paper presents the results of studies of flat solar collectors serving to heat the coolant used mainly for the needs of hot water supply for individual consumers. In the experiments conducted, flat solar collectors with an absorber made of copper and stainless steel were used. Studies have shown that it is possible to more fully use the capabilities of one or another solar collector,

depending on the operating mode of the entire solar hot water supply system. The presented studies were carried out by the staff of the Department of Renewable Energy Sources and Electrical Systems and Networks of the Sevastopol State University at the Institute of Nuclear Energy and Industry. Tests have shown that solar installations for the direct conversion of a radiation flux into thermal energy have a significant conversion factor compared to that of the solar power generating systems. Solar heat supply systems are used for private consumers and, in most cases, for heating hot water, and their use for heat supply systems allows, under certain conditions, to achieve high energy indicators. Solar power plants can be used in many southern regions of the Russian Federation; with their help it is possible to provide autonomous consumers with heat and hot water, while significantly saving fossil fuel and reducing harmful emissions into the atmosphere. In the Crimean region, the proposed systems can be most efficiently used in the spring-summer-autumn period, i.e. from May to September, which will significantly improve the environmental situation.

*Keywords:* flat solar collector, photovoltaic module, solar hot water installation, heat absorber, solar heating system, storage tank