

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕЛИОСИСТЕМ В ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ, РАБОТАЮЩИХ В МЕСТАХ ДЕФИЦИТА ЭНЕРГИИ И НА КОРАБЛЯХ ДАЛЬНОГО ПЛАВАНИЯ

*В статье рассматривается решение проблемы с дефицитом электрической энергии в трудно-доступных регионах, в местах экологических катастроф, на судовых кораблях дальнего следования за счет разработки энергоэффективной установки, работающей на возобновляемых источниках энергии, компактных размеров и с возможностью быстрого монтажа и запуска. За счет разработки экспериментального стенда солнечной электростанции и экспериментальных исследований получены необходимые тепловые параметры для работы с мини-паровой турбиной, работающей на паре с температурой более 190 °С и с давлением 5 Бар. Приведено описание возможности получения энергии для электростанции за счет преобразования солнечной энергии в тепловую при помощи солнечных коллекторов и солнечных концентраторов. Приведены технические характеристики устройств, предназначенных для преобразования солнечной энергии в тепловую. Проведен анализ, на основании которого выбраны оптимальные методы для преобразования солнечной энергии. Представлен экспериментальный стенд с новым методом выработки электрической энергии за счет использования тепловой энергии солнца. Рассчитаны характеристики паровой турбины для работы в составе солнечной электростанции. Представлена и описана схема выработки пара. Приведены результаты производительности электростанции для различных времен года при использовании различной площади солнечного концентратора и количества трубок вакуумного коллектора. На основании экспериментальных исследований и теоретических расчетов впервые получена зависимость окупаемости станции при использовании концентратора и коллектора от региона использования установки. Выявлены зависимость окупаемости установки от площади солнечных концентраторов и количества трубок вакуумных коллекторов. Доказана целесообразность использования солнечных коллекторов и солнечных концентраторов в составе электростанции для выработки электрической энергии от одного комплекса в объеме 7,5 кВт·ч на территории Российской Федерации.*

*Ключевые слова: солнечная электростанция, линзы Френеля, солнечный концентратор, вакуумный коллектор, паровая турбина.*

### Введение

Получение сухого и насыщенного пара для паровой турбины солнечной электростанции происходит посредством нагрева воды и последующего ее испарения за счет использования солнечных концентраторов, коллекторов, отражателей и нагревателей на базе линз Френеля. Выбор метода во многом зависит от географического расположения и требований, предъявляемых к установке.

На сегодняшний день в России солнечная энергетика не нашла широкого применения в процессах выработки электрической энергии за счет использования паровой турбины, вследствие чего отсутствуют данные, по которым можно было бы определить целесообразность использования различных методов для получения пара на определенной территории. Вследствие этого необходимо на основаниях экспериментальных исследований и теоретических расчетов провести анализ по выбору оптимального метода для получения пара за счет использования солнечной энергии на территории Российской Федерации.

Составлена классификация устройств, которые можно использовать в составе солнечной электростанции на паровой турбине (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов преобразования солнечной энергии в тепловую энергию

### Основная часть

Проведенный анализ и экспериментальные исследования солнечных опреснителей позволили предложить новый метод выработки электрической энергии, где в качестве источника тепловой энергии для солнечной электростанции используются вакуумные солнечные коллекторы (помимо известных устройств, работающих на солнечных концентраторах) в виде линз Френеля. Их основные технические характеристики приведены в таблице [1] – [4].

#### Технические характеристики солнечных концентраторов и коллекторов

Параметр Тип	Тепловая мощность, кВт	Площадь, м <sup>2</sup>	Максимальная температура, °С	Вес, кг	КПД, %
Линзы Френеля (Solar Dish)	45	63	800	92	73
Трубчатые вакуумные коллекторы	40	32	250	66	80

Рассчитано, что для работы паровой турбины серии VAMAN компании *Mizun Consultant* (рис. 2) с генератором переменного тока мощностью 7,5 кВт, необходимо 42 кВт·ч тепловой энергии для выработки пара объемом 64 кг/ч, при 190 °С и при давлении 10,5 бар.

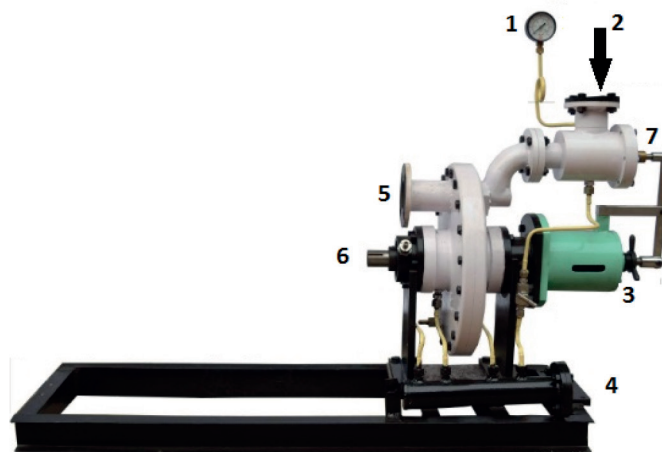


Рис. 2. Паровая турбина малой мощности:

1 — манометр; 2 — трубопровод подачи пара; 3 — регулятор скорости;  
4 — трубопровод выхода конденсата; 5 — выпуск пара; 6 — приводной вал

Выявлено, что для получения 42 кВт·ч тепловой энергии потребуется три солнечных концентратора диаметром 6 м (рис. 3, а) или 400 трубок вакуумных солнечных коллекторов, имитация работы которых была проведена на разработанном стенде (рис. 3, б) [5].

а)



б)



Рис. 3. Солнечный концентратор в форме тарелки (линзы Френеля) — а; экспериментальный стенд выработки электрической энергии за счет использования солнечной энергии — б;

1 — солнечные коллекторы; 2 — опреснитель; 3 — циркуляционный насос; 4 — тепловая турбина и генератор; 5 — теплообменник

Представлены варианты использования солнечных коллекторов и концентраторов в составе солнечной электростанции (рис. 4).

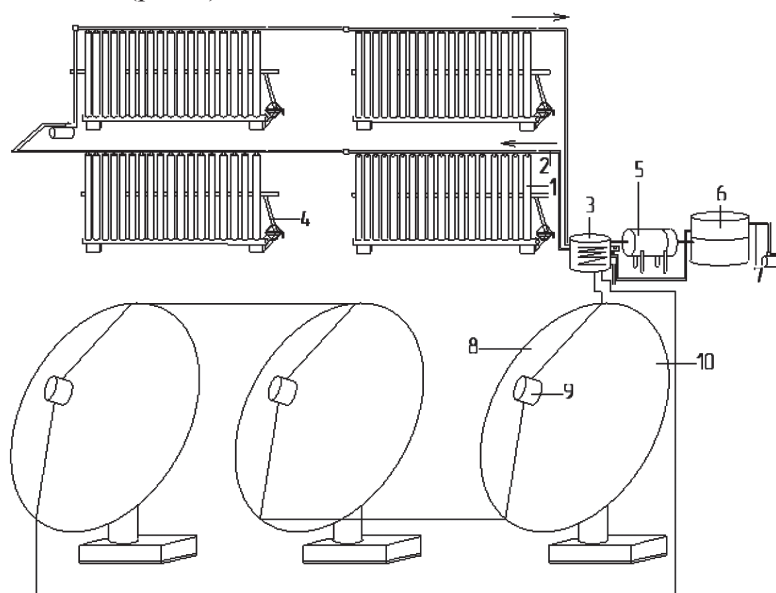


Рис. 4. Схема использования солнечных коллекторов и концентраторов в составе электростанции:

1 — солнечный коллектор; 2 — теплоноситель; 3 — теплообменник; 4 — система слежения за солнцем; 5 — паровая турбина; 6 — конденсатор; 7 — дистиллят; 8 — теплоноситель; 9 — теплообменник; 10 — солнечный концентратор

Принят следующий принцип действия солнечной электростанции: на начальном этапе за счет использования солнечных коллекторов и концентраторов происходит преобразование солнечной энергии в тепловую энергию, которая через теплоноситель передается в теплообменник, где происходит выработка пара и подача его в паровую турбину, откуда отработанный пар попадает в конденсатор.

### Обсуждение основных результатов

Получена зависимость от времени количества трубок солнечных коллекторов и количество солнечных концентраторов года для выработки тепловой мощности порядка 42 кВт (рис. 5).

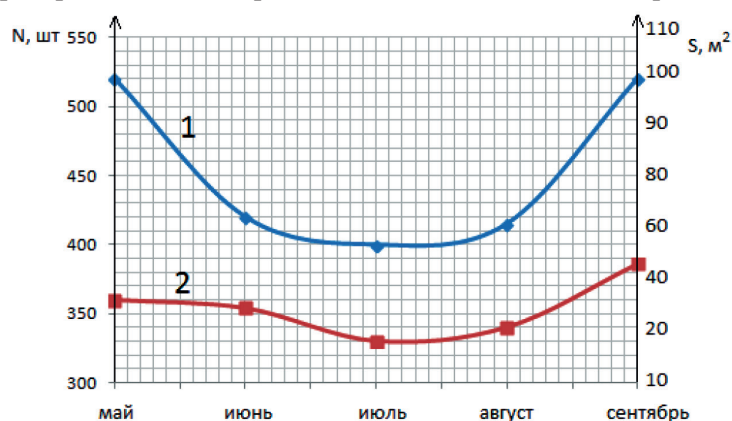


Рис. 5. Зависимость от времени года количества трубок солнечных коллекторов — 1 ( $N$ , шт.) и количество солнечных концентраторов — 2 ( $S$ ,  $m^2$ ) для выработки тепловой энергии 42 кВт·ч

Выявлено, что зависимость от времени года производительности солнечной электростанции при использовании солнечных коллекторов и использовании концентраторов имеет схожие характеристики. Производительность установки максимальна в летние месяцы, после чего начинает уменьшаться, что связано с уменьшением интенсивности солнечного излучения и уменьшением светового дня. Вследствие этого для поддержания заданной мощности требуется увеличение площади солнечных концентраторов и количества трубок вакуумного коллектора.

Солнечные концентраторы, несмотря на широкое применение в странах Северной Америки и Западной Европы, используется все же для узкого спектра задач, поэтому не производятся в промышленных масштабах для бытового потребителя. Стоимость известных образцов завышена и составляет от 1 170 000 руб. для мощности 7 кВт — в зависимости от производителя. При этом стоимость системы солнечных коллекторов составит 320 000 руб. без использования генератора.

Рассчитан период окупаемости солнечной электростанции мощностью 7,5 кВт при использовании солнечных коллекторов и концентраторов (рис. 6).

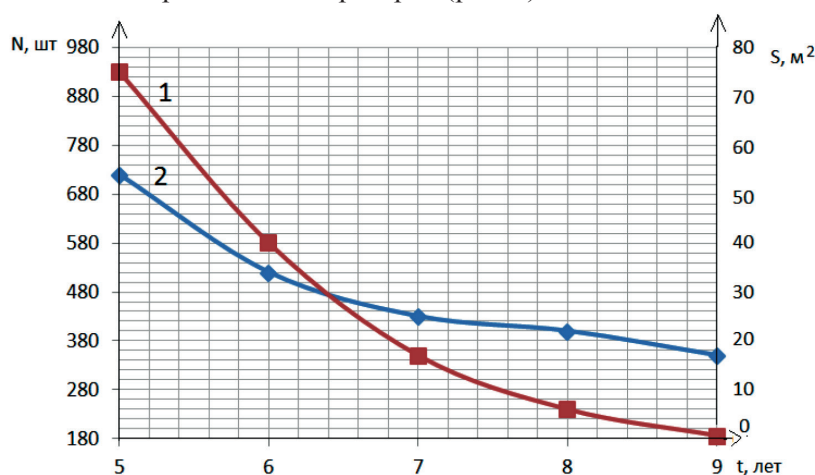


Рис. 6. Окупаемость установки при использовании солнечных коллекторов и концентраторов



Доказано, что окупаемость солнечной электростанции при использовании солнечных коллекторов превосходит солнечные концентраторы при работе в составе солнечной электростанции на 7,5 кВт, что связано с меньшей стоимостью системы преобразования солнечной энергии в тепловую. Однако при работе на большие мощности получена тенденция снижения срока окупаемости при использовании солнечных концентраторов, что связано с увеличением площади солнечного концентратора в два раза. Стоимость установки увеличивается в среднем в 1,5 раза, например, при использовании концентраторов фирмы *SolarSystem* [6]. Выявлена линейная зависимость увеличения стоимости системы выработки пара от ее мощности при использовании солнечных коллекторов в составе электростанции.

Известно, что солнечные концентраторы способны получать пар с температурой более 200 °С, на нем работают паровые генераторы мощностью более 50 кВт, для них использование солнечных коллекторов не представляется возможным [7] – [10].

Для работы солнечных концентраторов требуется система слежения за солнцем и безоблачная погода, так как рассеянное излучение, в отличие от вакуумных коллекторов, концентраторами не используется.

### Выводы

При использовании солнечной электростанции с паровой турбиной мощностью 7,5 кВт, с температурой пара не более 190 °С, при давлении 5 Бар, с поступлением солнечной радиации в пределах 1000 – 1300 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год для выработки пара рекомендуется использовать вакуумные солнечные коллекторы с коэффициентом поглощения  $k_p > 0,94$  %, коэффициентом излучения  $k_i < 0,06$  % и площадью не менее 0,08 м<sup>2</sup> в количестве от 400 штук, с общей площадью расположения солнечной электростанции 35 м<sup>2</sup> и с возможностью работы комплекса от 30 % при рассеянном солнечном излучении.

Доказано, что при использовании паровой турбины мощностью от 50 кВт целесообразно использовать солнечные концентраторы с коэффициентом мощности (power factor)  $k_{pw} > 0,95$  % и гармоническим искажением  $< 5$  %.

Доказано, что разработанную установку мощностью 7,5 кВт целесообразно использовать в регионах с дефицитом электрической энергии, в труднодоступных регионах, в местах экологических катастроф и на кораблях дальнего следования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирпичникова И. М. Опреснение воды с использованием энергий ветра и солнца / И. М. Кирпичникова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2012. — № 16. — С. 22–25.
2. Агамалиев М. М. Технология комбинированного опреснения морской воды с использованием вторичным энергоресурсов / М. М. Агамалиев // Энергосбережение и водоподготовка. — 2007. — № 4. — С. 14–16.
3. Рахматулин И. Р. Экспериментальные исследования влияния устройства слежения за солнцем на производительность солнечной опреснительной установки / И. Р. Рахматулин // Ползуновский вестник. — 2013. — № 4–2. — С. 168–171.
4. Кирпичникова И. М. Экспериментальные исследования лабораторного опреснителя воды / И. М. Кирпичникова, И. Р. Рахматулин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — № 1–2 (118). — С. 40–43.
5. Кирпичникова И. М. Использование паровой турбины в составе солнечной опреснительной установки / И. М. Кирпичникова, И. Р. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 57–61. DOI: 10.14529/power160307.
6. Рахматулин И. Р. Сравнительный анализ использования солнечного коллектора и солнечного концентратора для опреснения воды / И. Р. Рахматулин // Наука ЮУрГУ: матер. 65-й науч. конф. Секции технических наук: в 2 т. — Челябинск: изд. центр ЮУрГУ, 2013. — Т. 2. — С. 190–193.

7. Валамин А. Е. Теплофикационная паровая турбина Т-125/150-12.8 / А. Е. Валамин, А. Ю. Култышев, А. А. Гольдберг [и др.] // Теплоэнергетика. — 2014. — № 12. — С. 3. DOI: 10.1134/S004036361412008X.
8. Баринберг Г. Д. Теплофикационная паровая турбина Т-113/145-12,4 / Г. Д. Баринберг, А. Е. Валамин, Ю. А. Сахнин [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. — 2010. — № 11. — С. 38–41.
9. Ивановский А. А. Перспективы строительства ТЭЦ с паровыми турбина с противодавлением / А. А. Ивановский, А. Ю. Култышев, М. Ю. Степанов // Теплоэнергетика. — 2014. — № 12. — С. 37. DOI: 10.1134/S0040363614120030.
10. Чепурной М. Н. Энергетические характеристики газопаровых ТЭЦ с противодавленческими паровыми турбинами / М. Н. Чепурной, М. В. Бужинский // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2009. — № 2 (83). — С. 51–54.

## EFFICIENCY OF SOLAR SYSTEMS IN POWER STATIONS FOR WORKING IN PLACES DEFICIT ENERGY AND SHIPS DEEPWATER

*This paper described the problems of the deficit of electric energy problems in remote areas, in the areas of environmental disasters, ships long distance through the development of energy-efficient installation operating on renewable energy sources, compact size, and with the possibility of rapid installation. After development of a solar power plant stand and experimental studies, obtained thermal parameters for use with mini-steam turbine operating on steam at a temperature of more  $t - 190$  C and a pressure of 5 bar. Description of the possibility of obtaining energy for power by converting solar energy into thermal energy by means of solar collectors and solar concentrators. The technical characteristics of the devices for converting solar energy into thermal energy. The analysis, based on which best methods are selected for the conversion of solar energy. The experimental stand with a new method of generating electric power by using solar thermal energy. Results of the steam turbine characteristics for operation in the solar power plant. Presented and described steam generation circuit. The results of produce for different times of the year when using various sizes of solar concentrator and the amount of vacuum collector tubes. On the basis of experimental studies and theoretical calculations for the first time the dependence payback station when using the hub and the collector region by using the installer. The regularities of payback from the installation area of solar concentrators and the number of vacuum tube collectors. The expediency of the use of solar collectors and solar concentrators as a part of the power plant for generating electrical energy from one set amount of 7.5 kW / h on the territory of the Russian Federation.*

*Keywords: solar power, Fresnel lenses, solar concentrator, vacuum tube, steam turbine.*

## REFERENCES

1. Kirpichnikova, Irina Mikhailovna. "Water desalination with the use of wind and solar energy." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 16 (2012): 22–25.
2. Agamaliyev, M. M. "Tehnologija kombinirovannogo opresneniya morskoy vody s ispolzovaniem vtorichnym jenergoresursov." *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka* 4 (2007): 14–16.
3. Rahmatulin, I. R. "Jeksperimentalnye issledovaniya vlijanija ustrojstva slezhenija za solncem na proizvoditelnost solnechnoj opresnitelnoj ustanovki." *Polzunovskij vestnik* 4-2 (2013): 168–171.
4. Kirpichnikova, I. M., and I. R. Rakhmatulin. "Experimental researches of laboratory water desalinators." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 1-2 (118) (2013): 40–43.
5. Kirpichnikova, I. M., and I. R. Rakhmatulin. "Steam turbine in solar desalination plant." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 16.3 (2016): 57–61. DOI: 10.14529/power160307.
6. Rahmatulin, I. R. "Sravnitelnyj analiz ispolzovaniya solnechnogo kollektora i solnechnogo koncentratora dlya opresneniya vody." *Nauka YUUrGU: materialy 65-j nauchnoj konferencii. Sekcii tekhnicheskikh nauk: v 2 t.* Chelyabinsk: Izdatelskij centr YUUrGU, 2013. T. 2. 190–193.
7. Valamin, A. E., A. Yu. Kultyshev, A. A. Gol'dberg, Yu. A. Sakhnin, V. N. Bilan, M. Yu. Stepanov, E. N. Polyaeva, M. V. Shekhter, and T. L. Shibaev. "The T-125/150-12.8 cogeneration steam turbine." *Thermal Engineering* 61.12 (2014): 849–856. DOI: 10.1134/S0040601514120076.
8. Barinberg, G. D., A. E. Valamin, Ju. A. Sahnin, A. A. Ivanovskij, A. Ju. Kultyshev, and V. B. Novoselov. "Teplofikacionnaja parovaja turbina T-113/145-12,4." *Nadezhnost i bezopasnost jenergetiki* 11 (2010): 38–41.

9. Ivanovskii, A. A., A. Yu. Kultyshev, and M. Yu. Stepanov. "Prospects for constructing cogeneration stations equipped with back-pressure steam turbines." *Thermal Engineering* 61.12 (2014): 880–883. DOI: 10.1134/S0040601514120039.

10. Cherpurnyy, M. M., and M. V. Buzhyns'kyi. "Energy characteristics of gas-steam heating plants with back-pressure steam turbines." *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute* 2(83) (2009): 51–54.

---

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рахматулин Ильдар Рафикович —  
кандидат технических наук.  
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»  
ildar.o2010@yandex.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rakhmatulin Ildar Rafikovich — PhD.  
FGAOU IN "South Ural State  
University (NIU)"  
ildar.o2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2016 г.