

## Электрогидравлический баланс солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением

# 02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0697540

Марахтанов М. К., Духопельников Д. В., Ивахненко С. Г., Крылов В. И.

УДК 53.06

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[mkm@power.bmstu.ru](mailto:mkm@power.bmstu.ru)

[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)

[ivakhnenko@bmstu.ru](mailto:ivakhnenko@bmstu.ru)

### Введение

Альтернативные источники энергии получают все большее распространение в современном мире. Солнечные, ветряные, приливные, геотермальные установки увеличивают долю своего участия в энергетическом обеспечении автономных объектов.

Одной из наиболее распространенных схем использования солнечной энергии является солнечный коллектор [1, 2, 3]. В основе его работы лежит нагрев солнечным излучением теплоносителя через специальную принимающую поверхность – абсорбер. Теплоноситель циркулирует в замкнутом контуре и передает тепло в теплоаккумулятор, в котором подогревается вода второго контура, которая может быть использована в системах горячего водоснабжения (ГВС).

Перспективная схема солнечного коллектора была предложена в [4]. Основной ее особенностью является то, что помимо абсорбирующей панели в ней используются фотоэлектрические преобразователи, вырабатывающие электрическую энергию для работы циркуляционного насоса. При этом для работы всей системы не требуется внешних источников питания, т.е. она является автономной. При проектировании такого коллектора необходимо рассчитать необходимые теплофизические параметры, обеспечивающие бесперебойную работу системы.

### Схема установки

Схема работы солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением изображена на рисунке 1. Солнечное излучение принимается поверхностью абсорбера и передается теплоносителю, циркулирующему по замкнутому трубопроводу первого контура. Теплоноситель отдает тепло второму контуру в аккумуляторе, в котором в течение дня идет накопление воды для системы ГВС. Движение теплоносителя в контуре обеспечивается циркуляционным насосом. Для автономной работы коллектора требуется энергонезависимая система электропитания насоса. Для этого предлагается использовать панель фотоэлементов, преобразующих солнечное излучение в постоянный электрический ток напряжением 12 В. В случае недостатка солнечной энергии питание обеспечивается батареей аккумуляторов. Фотоэлектрические преобразователи подключаются к системе питания через устройство согласования, обеспечивающее непрерывное электропитание.

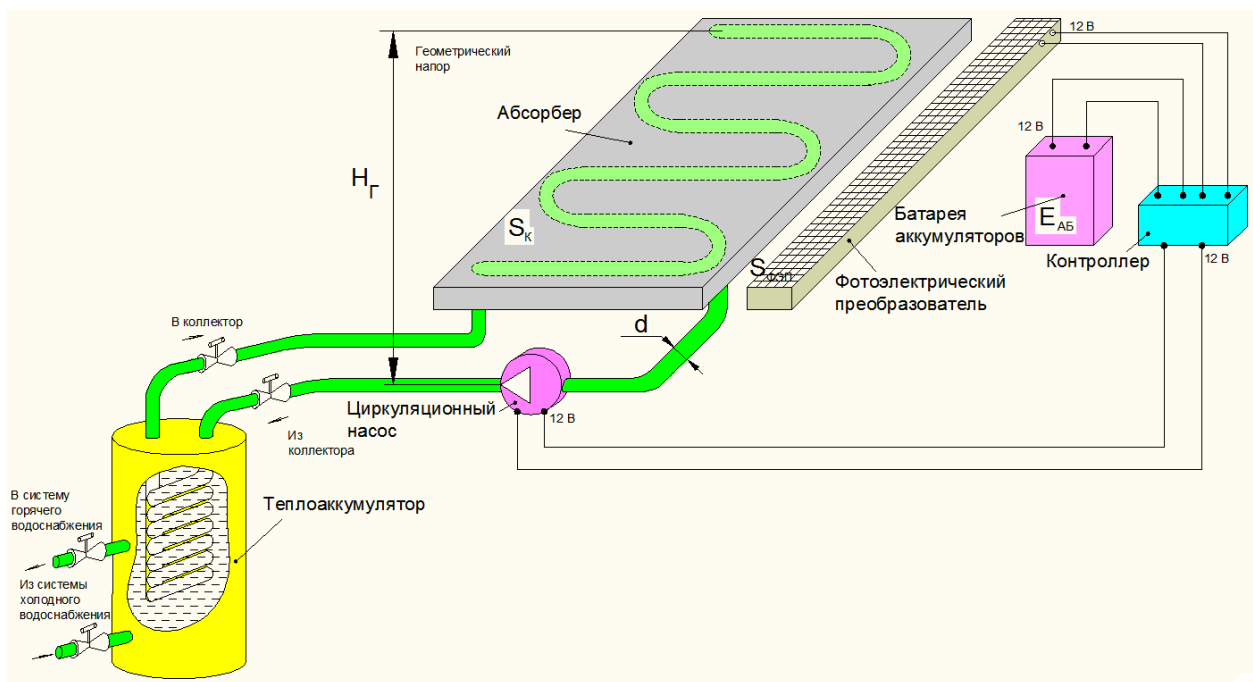


Рис. 1. Схема работы солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением

### Расчет распределения плотности мощности солнечного излучения

Распределение плотности мощности  $q_{sol}$  Вт/м<sup>2</sup> солнечного излучения по времени работы  $t$ , с будем считать подчиняющимся синусоидальной зависимости в течении светлого времени суток продолжительностью  $\tau$ , с:

$$q_{sol}(t) = q_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), \quad (1)$$

где  $q_{max}$  – пиковая дневная удельная плотность мощности,

Величина  $q_{max}$  рассчитывается из величины суммарной суточной энергии, приходящийся на квадратный метр поверхности в какой-либо местности:

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{\tau} q_{max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) dt = \frac{2\tau}{\pi} q_{max}$$
$$q_{max} = \frac{\pi Q_{\Sigma}}{2\tau} \quad (2)$$

Для летних месяцев в Москве величина пиковой дневной удельной плотности мощности составляет около 520 Вт/м<sup>2</sup>, в Сочи – 700 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 2 и 3).

Температура воды (или другого теплоносителя) в бойлере объемом  $V_{\delta}$  будет определяться подведенной к ней энергией  $Q_{\delta}(t)$  за прошедший промежуток времени:

$$T_{\delta}(t) = T_{\delta 0} + \frac{Q_{\delta}(t)}{c_p \rho V_{\delta}}, \quad (3)$$

где  $c_p$  – удельная массовая теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К,  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>.

Энергия  $Q_{\delta}(t)$  может быть вычислена как:

$$Q_{\delta}(t) = \int_0^t q_{max} S_K \eta_K \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) dt = \frac{q_{max} S_K \eta_K \tau}{\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\right), \quad (4)$$

где  $S_K$  – площадь принимающей поверхности коллектора,  $\eta_K$  – тепловой коэффициент полезного действия коллектора.

Тогда температуру воды можно оценить, поставляя (4) в (3):

$$T_{\delta}(t) = T_{\delta 0} + \frac{q_{max} S_K \eta_K \tau}{\pi c_p \rho V_{\delta}} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\right). \quad (5)$$

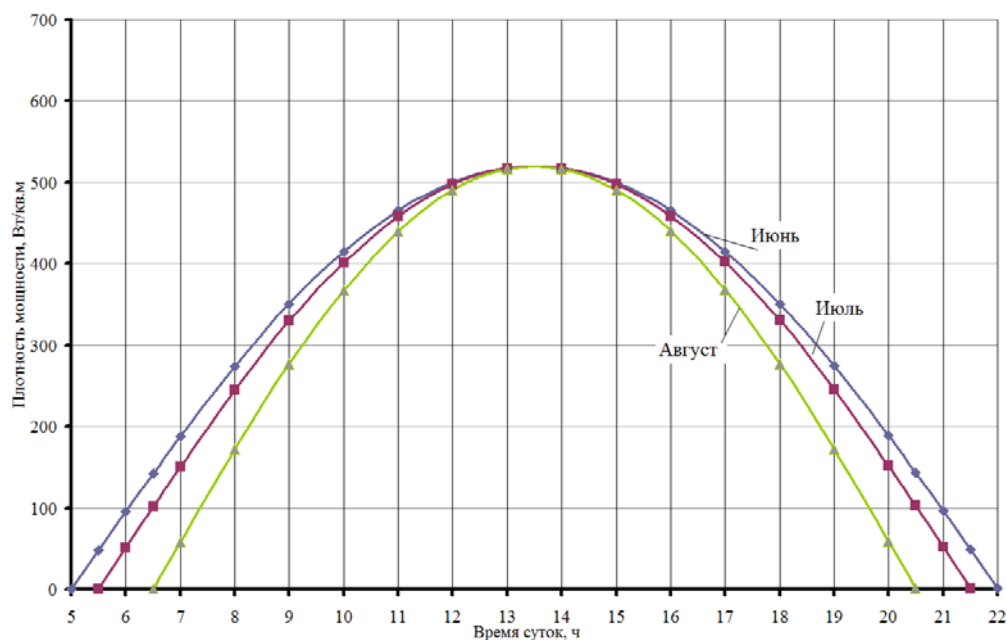


Рис. 2. Зависимость средней плотности мощности солнечного излучения в г. Москва в летние месяцы

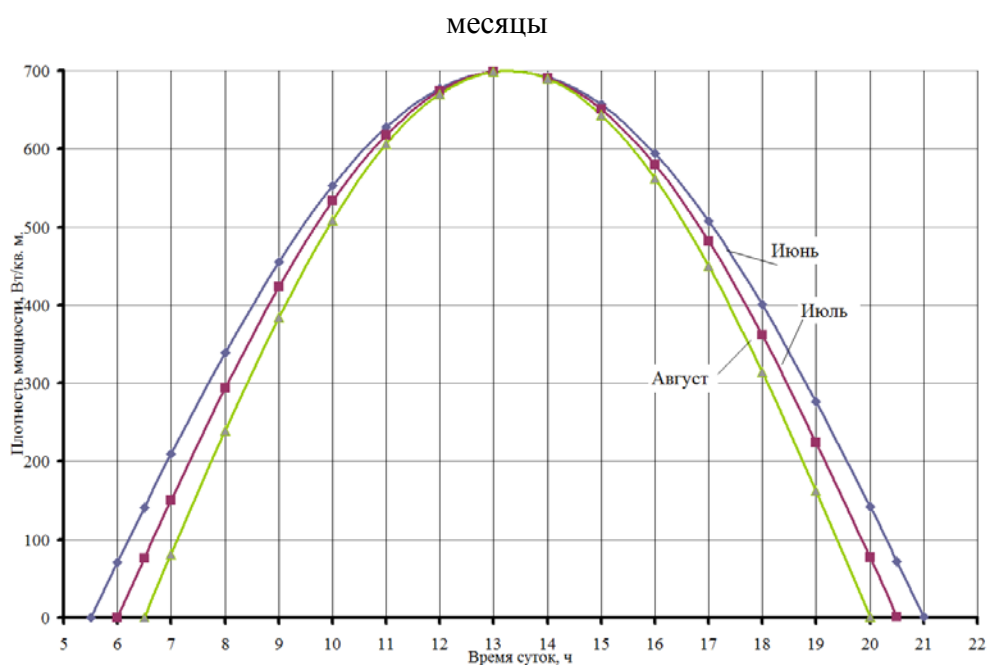


Рис. 3. Зависимость средней плотности мощности солнечного излучения в г. Сочи в летние месяцы

Динамика нагрева воды в летние месяцы в Москве и Сочи в теплоаккумуляторе объемом 150 литров при тепловом КПД коллектора, равным 77 %, рассчитанная по зависимости (5), показана на рисунке 4. Однако стоит заметить, что в действительности тепловой КПД не является постоянной величиной и зависит как от температуры воды (и соответственно времени работы), так и от внешних условий, таких как температура воздуха, скорость ветра. При увеличении разницы температур между водой и воздухом возрастает плотность потока мощности в окружающую среду как за счет конвективного, так и за счет лучистого теплообмена. Для того, чтобы снизить потери в окружающую среду и поддерживать высокое значение КПД, необходимо применять специальные селективные покрытия и толстые слои теплоизоляции, что было показано в работе [2].

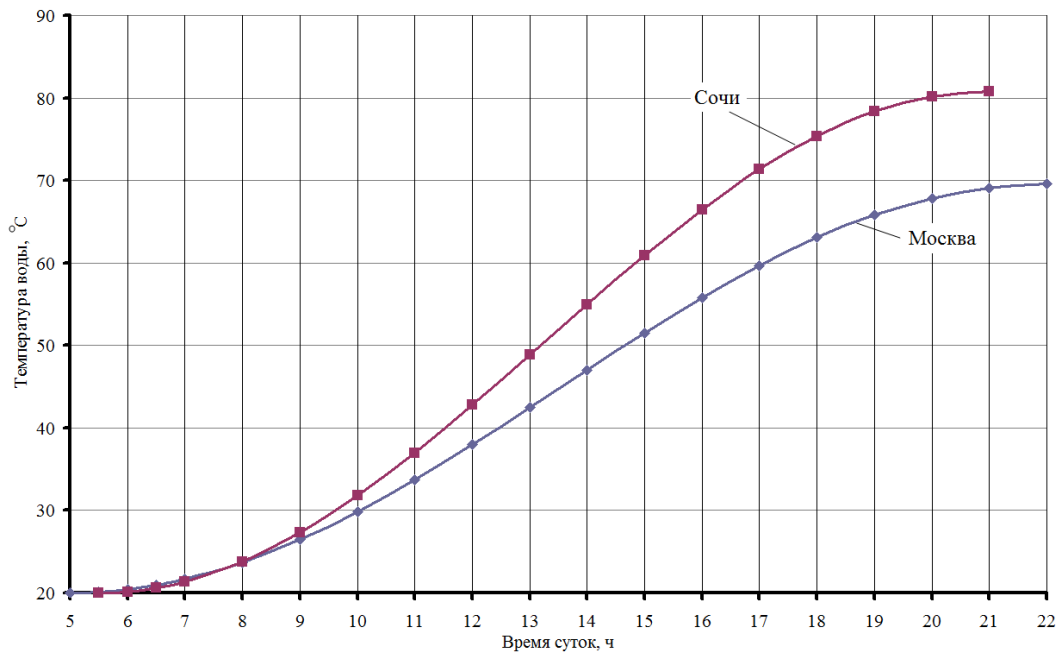


Рис. 4. Изменение температуры воды в теплоаккумуляторе в течение суток для г. Москвы и г. Сочи в летние месяцы

### *Электротеплогидравлическая модель*

Для обеспечения эффективного теплообмена в абсорбере необходимо организовать непрерывную циркуляцию теплоносителя в первичном контуре. Для этого необходим насос, который питается электроэнергией, вырабатываемой ФЭП. Необходимо реализовать такой режим работы, при котором эффективный теплообмен будет обеспечиваться при минимальных затратах электрической энергии на циркуляцию теплоносителя в первом контуре.

Суммарная суточная электрическая энергия  $Q_{\text{ФЭП}}$ , вырабатываемая фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) площадью  $S_{\text{ФЭП}}$  и коэффициентом полезного действия  $\eta_{\text{ФЭП}}$ , равна:

$$Q_{\text{ФЭП}} = S_{\text{ФЭП}} \eta_{\text{ФЭП}} \int_0^{\tau} q_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) dt = \frac{2\tau}{\pi} q_{\max} S_{\text{ФЭП}} \eta_{\text{ФЭП}} \quad (6)$$

Потребляемая насосом мощность  $N_{\text{нотр}}$  определяется расходом теплоносителя  $G$  через коллектор и потребным напором воды  $H_{\text{нотр}}$ :

$$N_{\text{нотр}} = \rho g \frac{GH_{\text{нотр}}}{\eta_H} \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что для снижения мощности насоса необходимо снижать потери напора в трубопроводе, а также уменьшать расход теплоносителя до минимальных значений.

Суммарная суточная энергия  $Q_{номр}$ , потребляемая насосом может быть вычислена как:

$$Q_{номр} = \tau N_{номр} = \rho g \tau \frac{GH_{номр}}{\eta_H} \quad (8)$$

где  $\eta_H$  – КПД насоса,  $g$  – ускорение свободного падения.

Суммарная суточная электроэнергия  $Q_{ФЭП}$  должна превышать энергию  $Q_{номр}$ , потребляемую насосом, чтобы обеспечивать ежедневный цикл работы коллектора в теплый период времени. При этом, в отдельные участки времени (утренние и вечерние часы), текущее значение мощности ФЭП  $N_{ФЭП}$  может быть ниже, чем мощность потребляемая насосом  $N_{номр}$ . В это время работу насоса будет обеспечивать аккумуляторная батарея.

Когда мощность ФЭП  $N_{ФЭП}$  превышает мощность насоса  $N_{номр}$ , излишек энергии будет компенсировать потери заряда батареи. Таким образом:

$$\rho g \tau \frac{GH_{номр}}{\eta_H} = \frac{2\tau}{\pi} q_{\max} S_{ФЭП} \eta_{ФЭП}$$

Откуда минимальное необходимое значение площади ФЭП можно вычислить как:

$$S_{ФЭП} = \frac{\rho g \pi GH_{номр}}{2q_{\max} \eta_H \eta_{ФЭП}} \quad (9)$$

Потребный напор насоса определяется гидравлическим сопротивлением отдельных участков трубопровода  $\Delta h_i$  (разностью давлений в трубопроводе и геометрическим напором пренебрегаем, т.к. система закрытая):

$$H_{номр} = \sum_i \Delta h_i \quad (10)$$

Гидравлическое сопротивление трубопровода будем считать по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{8LG^2}{\pi g d^5}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент потерь,  $V$  – скорость потока в трубопроводе,  $d$  – диаметр трубопровода,  $L$  – длина трубопровода.

Коэффициент  $\lambda$  может быть найден с помощью значения числа Рейнольдса  $Re$  при условии турбулентного течения:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = 0,316 \left( \frac{4G}{\nu \pi d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Минимальный потребный расход определим из условия перехода ламинарного режима течения в турбулентный, так как при этом теплообмен в коллекторе и теплоаккумуляторе будет

наиболее эффективным. Будем считать этот расход оптимальным. Критерий Рейнольдса  $Re_{kr}$ , при котором происходит изменение характера течения, равен 2300. Тогда из (12) получаем значение коэффициента сопротивления  $\lambda$ , равное 0,05. Из выражения для критерия Рейнольдса получаем значение оптимального расхода теплоносителя:

$$G_{opt} = \frac{\nu d Re_{kr}}{4} \quad (13)$$

Гидравлические потери при оптимальном расходе теплоносителя (13) будем определять как:

$$\Delta h = \frac{8\lambda L}{\pi g d^5} \left( \frac{\nu d Re_{kr}}{4} \right)^2 = \frac{\lambda L \nu^2 Re_{kr}^2}{2\pi g d^3} \quad (14)$$

Подставляем полученное выражение (14) в (9) с учетом (10) и (13) и получаем выражение для потребной площади ФЭП с учетом гидравлических потерь в оптимальном режиме течения теплоносителя:

$$S_{ФЭП} = \frac{\rho g \pi}{2q_{max} \eta_H \eta_{ФЭП}} \frac{\nu d Re_{kr}}{4} \frac{\lambda L \nu^2 Re_{kr}^2}{\pi g d^3} = \frac{\rho \lambda \nu^3 Re_{kr}^3}{16} \frac{L}{q_{max} \eta_H \eta_{ФЭП} d^2} \quad (15)$$

Длину трубопровода будет складываться из длины трубопровода в абсорбере  $L_a$ , в теплообменнике  $L_T$  и на соединяющем их участке  $L_{mid}$ . Наибольшие потери будут на первых двух участках, поэтому третьим составляющим будем пренебрегать. Также будем считать, что гидравлические длины трубопроводов в абсорбере и теплообменнике примерно равны. Конфигурация теплообменных труб под абсорбером определяется особенностями теплообмена, но для простоты оценки будем считать, что трубы полностью заполняют пространство под абсорбером. Тогда длину  $L$  можно вычислить следующим образом:

$$L = L_a + L_T + L_{mid} = 2L_a = 2 \frac{S_k}{d} \quad (16)$$

Подставляя (16) в (15) получаем соотношение для площадей абсорбера и ФЭП:

$$\frac{S_{ФЭП}}{S_k} = \frac{\rho \lambda \nu^3 Re_{kr}^3}{8} \frac{1}{q_{max} \eta_H \eta_{ФЭП} d^3} \quad (17)$$

Площадь абсорбера находится из соотношения (5):

$$S_k = \frac{\pi c_p \rho}{2q_{max} \eta_K} \frac{\Delta T V_{\delta}}{\tau} \quad (18)$$

где  $\Delta T$  – температура, на которую необходимо нагреть воду в бойлере.

Подставляя выражение (18) в (17) можно получить минимальное потребное значение площади ФЭП:

$$S_{ФЭП} = \frac{\nu^3 \pi c_p \rho^2 \lambda Re_{kr}^3}{16d^3} \frac{1}{q_{max}^2 \eta_K \eta_H \eta_{ФЭП}} \frac{\Delta T V_{\delta}}{\tau} \quad (19)$$

На рисунке 6 приведены зависимости потребной площади ФЭП от пиковой мощности солнечного излучения при различных объемах теплоаккумулятора. Исходя из полученных зависимостей можно сказать, что для типовых внешних параметрах необходимая площадь ФЭП составляет около 100–300 см<sup>2</sup>.

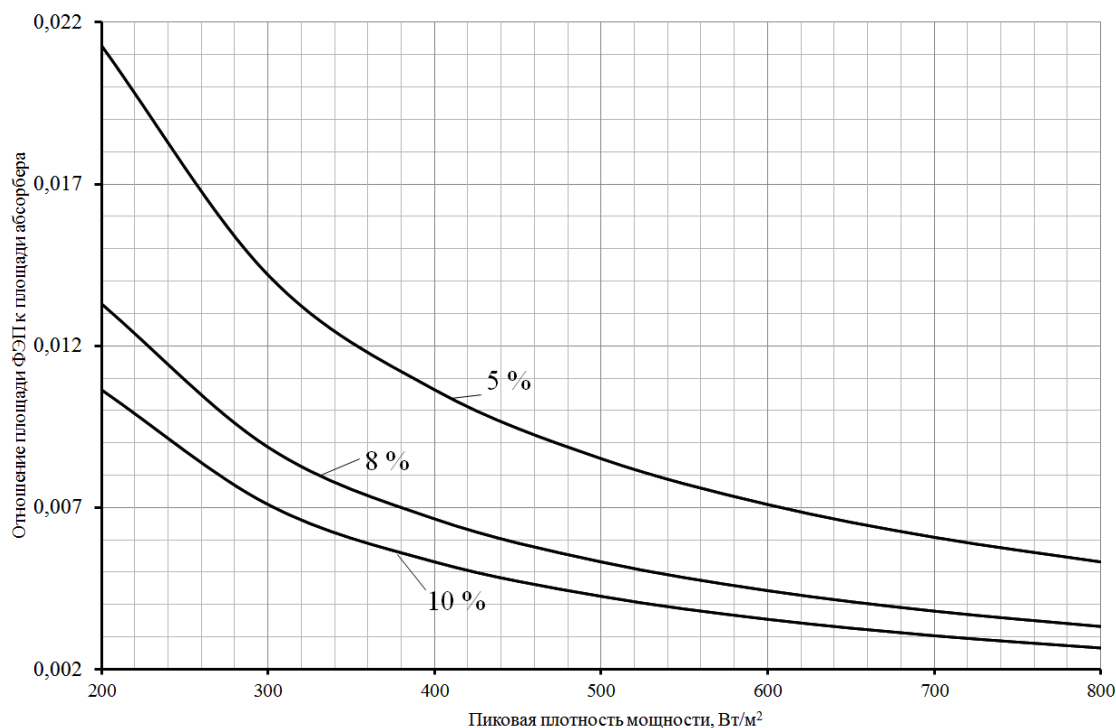


Рис. 5. Зависимость отношения площади ФЭП к площади абсорбера от пиковой плотности солнечного излучения при различных КПД ФЭП; КПД насоса принят 70 %, теплоноситель – вода, диаметр трубопровода – 8 мм.

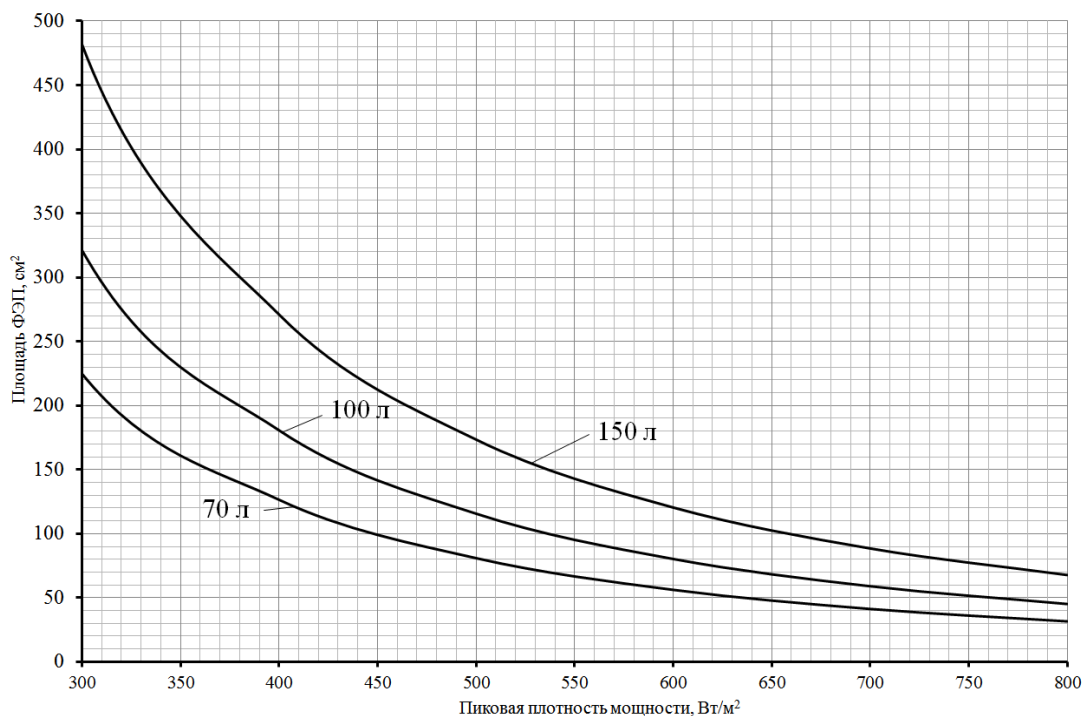


Рис. 6. Зависимость потребной площади ФЭП от пиковой плотности солнечного излучения при различных объемах теплоаккумулятора;



КПД коллектора – 70 %, КПД насоса – 70 %, КПД ФЭП – 8 %, теплоноситель – вода,  
диаметр трубопровода – 8 мм.

### ***Выводы***

1. Полученная в работе электротеплогидравлическая модель солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением позволяет рассчитать основные параметры узлов, входящих в состав установки.
2. Выполненные оценочные расчеты показывают, что необходимые размеры ФЭП имеют приемлемые величины.
3. Для уточнения параметров установки необходимо произвести расчет процессов конвективного теплообмена в абсорбере для оптимизации конструкции с целью уменьшения тепловых и гидравлических потерь.

### **Список литературы**

1. Бутузов В.А., Шетов В.Х., Брянцева Е.В., Бутузов В.В., Гнатюк И.С. Солнечные коллекторы. Тенденции совершенствования конструкций // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 10. С. 41-51.
2. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К. Селективные покрытия солнечных коллекторов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. Спец. вып. «Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана». С. 75-80.
3. Марахтанов М.К. и др. Анализ влияния свойств селективных покрытий на тепловой режим и рабочие характеристики солнечных коллекторов // 7-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология»: матер. / под ред. д.т.н., проф. С.Б. Нестерова. Москва, 2012.
4. Литвинова В.В., Ивахненко С.Г. Анализ конструкции солнечного коллектора с независимым источником питания насоса // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569345.html> (дата обращения 01.01.2014).

## The electrohydraulic balance of the solar heat storage with autonomous power supply

# 02, February 2014

DOI: **10.7463/0214.0697540**

**M.K. Marahtanov, D.V. Duhopel'nikov, S.G. Ivakhnenko, V.I. Krylov**

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[mkm@power.bmstu.ru](mailto:mkm@power.bmstu.ru)

[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)

[ivakhnenko@bmstu.ru](mailto:ivakhnenko@bmstu.ru)

The introduction of the paper emphasizes an increasingly important role of alternative power sources nowadays. At the same time, a solar collector (suntrap) is one of the most frequent techniques to use the solar energy. It is an absorber that picks up solar radiation and heats a heat carrier circulating in the close loop. Then the heat is transferred to the heat accumulator that is integrated in the hot-tap water system (HWS).

The paper presents a prospective circuit of the solar collector. It differs from the traditional one because, in addition to absorbing panel, it uses photoconverters to generate electric power for the circulating pump. The advantage of this system is that for operation such a solar energy converter has no need in external power sources, i.e. it is autonomous. The need to calculate the essential thermo-physical parameters that ensure no-break system operation was stated as a main objective of the work.

The suggested circuit has a photocell panel to convert solar radiation into dc voltage of 12 V. In case of a lack of the solar energy an accumulator battery can be used for feeding. To ensure the no-break supply of power an adaptor is offered.

To calculate a density distribution of solar radiation a sine law is offered depending on the time of day and geographical locality. This dependence was used to obtain the expressions for calculating the water temperature in boiler over daytime.

Further, the calculations have been done for the operating conditions under which an efficient heat exchange will be provided with the minimum consumption of electric power for the heat carrier circulation in the first loop. For this purpose, a pump power was calculated depending on consumption

and hydraulic losses of head in the pipeline. As a minimum required consumption the value has been chosen at which a laminar flow regime changes to the turbulent one because of the most efficient heat exchange being both in collector and in heat accumulator. The hydraulic loss has been calculated by Darcy-Weisbach equation. Finally, the formula has been obtained to calculate a minimum area of photo converters to be needed for the solar power system to ensure no-break operation. As a result of studies, it has been found that with typical external parameters, the area required for photo converters is about 100-300 cm<sup>2</sup>. Dependences to calculate main parameters of system components including necessary minimum areas of absorber and photo converter, pump power, heat carrier consumption has been obtained as well.

The paper conclusions are as follows. The model of solar heat accumulator obtained in the paper makes it possible to calculate main parameters of system components. Required photo converter dimensions have acceptable values. Also it is necessary to calculate the convection exchange processes in absorber to optimize a design for reducing the thermal and hydraulic losses.

Further, the paper presents the calculation of operating conditions under which an efficient heat exchange is ensured with minimum consumption of electric power for the heat carrier circulation in the first loop. For this, a pump power has been calculated depending on the consumption and hydraulic losses in the pipeline.

---

**Publications with keywords:** [solar radiation](#), [solar collector](#), [photovoltaic cell](#), [selective coating](#)  
**Publications with words:** [solar radiation](#), [solar collector](#), [photovoltaic cell](#), [selective coating](#)

---

### References

1. Butuzov V.A., Shetov V.Kh., Bryantseva E.V., Butuzov V.V., Gnatyuk I.S. [Solar collectors. Trends improving the design]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya - Alternative Energy and Ecology*, 2009, no. 10, pp. 41-51. (in Russian).
2. Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Marakhtanov M.K. [Selective coating of solar collectors]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, spec. iss. "Scientific papers of students and young scientists of the Bauman MSTU", pp. 75-80. (in Russian).
3. Marakhtanov M.K., et al. [Analysis of impact of properties of selective coatings on thermal regime and performance characteristics of solar collectors]. *7-aya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya": mater.* [Proc. of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference "Vacuum equipment, materials and technology"], Moscow, 2012. (in Russian).
4. Litvinova V.V., Ivakhnenko S.G. [Analysis of design of solar collector with independent source of power supply of pump]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2013, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569345.html> , accessed 01.01.2014. (in Russian).