



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

SOLAR ENERGY UNITS

Статья поступила в редакцию 21.12.17. Ред. пер. № 2640

The article has entered in publishing office 21.12.17. Ed. reg. No. 2640

УДК 620.92

ГЕЛИОСИСТЕМА С СЕЗОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛОТЫ*

В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин, А.В. Матвеев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия
тел.: +7(343)375-95-08; e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.01-03.017-025

Заключение совета рецензентов: 27.12.17 Заключение совета экспертов: 10.01.18 Принято к публикации: 15.01.18

Представлены результаты разработки методики комплексной оценки эффективности системы, включающей в себя солнечные коллекторы, бак-аккумулятор, грунтовый аккумулятор теплоты, а также системы отопления здания. Данная модель нестационарного теплообмена позволяет для различных климатических условий, типов гелиотехнического оборудования, типов систем отопления здания определить площадь и количество солнечных коллекторов и объем сезонного (грунтового) аккумулятора теплоты, обеспечивающих необходимые температурные характеристики здания. Для свойственного в условиях резкоконтинентального климата сезонного изменения приходов солнечной радиации и температуры окружающей среды получены аналитические выражения и выполнено численное исследование времени использования аккумулированной энергии для здания отапливаемой площадью 70 м². Показано, что при объеме грунтового аккумулятора тепла 500 м³ и максимальной температуре нагрева 90 °С запасенной энергии достаточно для обогрева здания системой «теплый пол» более чем на 100 суток. Представлены данные, подтверждающие целесообразность применения солнечных систем теплоснабжения с грунтовым аккумулятором теплоты для суровых климатических условий, характерных для Уральского федерального округа России. Использование грунтовых аккумуляторов теплоты является простым и малозатратным способом переноса во времени (с летнего на зимний период) энергии солнечного излучения, что позволяет существенно сократить затраты органического топлива на обогрев помещений в отопительный период.

Наибольшая эффективность использования аккумулированной в грунте энергии достигается благодаря низкотемпературным системам обогрева (теплый пол, воздушное отопление). Представленная методика является достаточно универсальной и может применяться для любых грунтов и накопительных сред, отличающихся от естественного грунта теплофизическими характеристиками (талькохлорит, талькомагнезит, солевые композиции и пр.), а также для других типов тепловых нагрузок, в том числе, для поддержания благоприятного температурного режима в плавательных бассейнах и сельскохозяйственных сооружениях закрытого грунта и пр.

Ключевые слова: гелиосистема; грунтовый аккумулятор; теплопроизводительность; система хранения энергии; солнечная радиация; частные дома; резкоконтинентальный климат.

*Пахалуев В.М., Щеклеин С.Е., Матвеев А.В. Гелиосистема с сезонным аккумулятором теплоты // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(01-03):17-25.



SOLAR SYSTEM WITH SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE

V.M. Pakhaluev, S.Ye. Shcheklein, A.V. Matveev

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mir St., Yekaterinburg, 620002, Russia
tel.: +7 (343) 375 95 08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

doi: 10.15518/isjeee.2018.01-03.017-025

Referred 27 December 2017 Received in revised form 10 January 2018 Accepted 15 January 2018

The paper presents the results of the development of a methodology for a comprehensive assessment of the system's efficiency, which includes solar collectors, a heat storage tank, a ground heat accumulator, and a building heating system. The model of non-stationary heat exchange makes it possible to determine the area and the number of solar collectors and the volume of a seasonal (ground) heat accumulator for various climatic conditions, types of solar engineering equipment, types of heating systems in the building, providing the necessary temperature characteristics of the building. We have obtained analytical expressions for a seasonal change in solar radiation and ambient temperatures typical for a sharply continental climate, and have made a numerical study of the time of use of the accumulated energy for a building with a heated area of 70 m². For a 500 m³ ground heat accumulator with a maximum heating temperature (90 °C), the stored energy is shown to be sufficient for heating the building with a warm floor system for more than 100 days. The paper submits the data confirming expediency of use of solar systems of heat supply with the ground heat accumulator for the severe climatic conditions characteristic of the Ural region of Russia. The use of ground heat accumulators is a simple and low-cost method of transferring solar energy in time (from summer to winter), which allows us to significantly reduce the cost of organic fuel for heating the premises during the heating season.

The greatest efficiency of use of the energy accumulated in the ground is achieved when applying low-temperature heating systems (underfloor heating, air heating). This technique is quite universal and can be used for any grounds and accumulative environments that differ from the natural ground by thermal physical characteristics (talcochlorite, talcomagnesite, salt compositions, etc.), as well as for other types of thermal loads, such as maintaining a favorable temperature regime in swimming pools and agricultural structures of enclosed soil.

Keywords: solar system; seasonal heat accumulator; heat performance; energy storage; solar radiation; private houses; sharply continental climate.



Валерий Максимович
Пахалуев
Valery Pakhaluev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомных станций и возобновляемых источников энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной академии наук о природе и обществе.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1961 г.).

Награды: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области (2011 г.).

Область научных интересов: теплофизические и физико-химические процессы в теплоэнергетике и металлургической теплотехнике; разработка физических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Публикации: более 90, в том числе 1 монография.

h-index: 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, professor at Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Urals Federal University; Member of International Academy of Natural and Social Sciences.

Education: Ural State Technical University, 1961.

Awards: Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region, 2011.

Research interests: thermophysical and physico-chemical processes in thermal power generation and metallurgical engineering with the development of the physical foundations of alternative and renewable energy sources.

Publications: more than 90 including 1 monograph.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной энергетической академии; член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», трудов Одесского национального политехнического университета, научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ».

Награды: Заслуженный энергетик России; действительный член Международной энергетической академии, национальная экологическая премия им. В.И. Вернадского, медаль «Ветеран атомной энергетики и промышленности».

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972 г.).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок; проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков; продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС; солнечная энергетика; ветровая энергетика; биоэнергетика.

Публикации: более 350, включая 2 монографии, 20 изобретений.

h-index: 11

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии».

Образование: УГТУ-УПИ инженер по специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (2004 г.).

Награды: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области (2011 г.).

Область научных интересов: возобновляемая энергетика; солнечная энергетика; ветроэнергетика; солнечные коллекторы; паровые турбины; газопоршневые электростанции.

Публикации: более 40.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, the Head of Atomic Stations and Renewable Energy Sources department of Urals Federal University; a member of International Energy Academy; a member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power", International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, "Nuclear Power Units Heat Engineering" USTU, Odessa National Polytechnic University article collection, Scientific Journal of "Energy Effectiveness and Analysis".

Awards: Honored Power Engineer of the Russian Federation, Member of the International Energy Academy, V.I. Vernadsky National Environmental Award, Medal "Veteran of Nuclear Energy and Industry".

Education: Urals Polytechnic Institute, 1972.

Research interests: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics.

Publications: more than 350 including 2 monographs, 20 inventions.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department.

Education: Ural State Technical University with a degree in engineering (Alternative and Renewable Sources of Energy), 2004.

Awards: Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk Region, 2011.

Research interests: renewable energy; solar energy; wind energy; solar collectors; steam turbines; gas-fired power plant.

Publications: more than 40.

Введение

Характерной особенностью систем, использующих солнечную энергию, является несовпадение времени поступления и потребления тепловой энергии при горячем водоснабжении и теплоснабжении жилых зданий и производственных помещений. В летний период гелиосистемы производят значительное количество не востребованной тепловой энергии, а в зимний период, напротив, имеет место дефицит теплоты, в связи с этим для таких систем необходимы устройства для аккумуляции энергии [1–4].

Для аккумулирующих систем основными показателями являются продолжительность периодов накопления теплоты в летний сезон и эффективность со-

хранения ее для использования в зимний период [5–7]. Поэтому эффективность сезонного аккумулятора теплоты (САТ) определяется его способностью накапливать и сохранять в течение длительного времени необходимое количество тепловой энергии, что наилучшим образом сочетается в САТ с тепловой изоляцией по границам аккумулятора.

Существует большое количество вариантов исполнения сезонных аккумуляторов теплоты [8–17]. Одним из вариантов является грунтовый накопитель теплоты, представляющий собой ограниченный теплоизоляцией массив грунта, в котором осуществляется подвод и съем теплоты, а сам массив грунта служит аккумулирующим материалом. Грунтовый аккумулятор без тепловой изоляции характеризуется



Андрей Валентинович
Матвеев
Andrey Matveev



значительными потерями энергии. Применение современных теплоизоляционных материалов позволяет поддерживать необходимый температурный уровень при отсутствии отопительной нагрузки [18–20].

В этой работе представлена методика комплексной оценки эффективности системы, включающей в себя солнечные коллекторы, бак-аккумулятор, грунтовый аккумулятор теплоты, а также системы ото-

пления здания. Впервые количественно доказывается, что наибольший эффект от аккумулирования энергии достигается за счёт систем отопления, способных обеспечить благоприятный температурный режим в здании при невысоких температурах греющего теплоносителя. Анализ результатов проводится на примере суровых климатических условий, характерных для Уральского федерального округа.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
δ	Толщина, мм
η	Коэффициент полезного действия
Θ	Температура, разность температур, °C
λ	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K)
ρ	Плотность, кг/м ³
τ	Время, ч, сут
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
c_p	Теплоемкость, Дж/°C
F	Площадь поверхности солнечного коллектора, м ²
k	Коэффициент
Q	Теплота Вт, месячное значение интенсивности солнечной радиации, МДж/(м ² ·мес)
q	Интенсивность солнечной радиации, Вт/м ²
R	Термическое сопротивление, К/Вт
S	Площадь поверхности, м ²
T	Температура, °C
V	Объем, м ³
<i>Индексы верхние</i>	
<i>month</i>	Суммарное значение за месяц
<i>n</i>	Номер летнего месяца
<i>Индексы нижние</i>	
<i>0</i>	Максимальная температура аккумулятора при зарядке
<i>hl</i>	Отопление
<i>insul</i>	Тепловая изоляция
<i>k</i>	Средняя температура теплоносителя, °C
<i>los</i>	Потери
<i>o</i>	Оптический КПД
<i>pipe</i>	Трубопроводы
<i>s</i>	Тепловой аккумулятор
<i>SC</i>	Солнечный коллектор
<i>soil</i>	Граница двух сред
<i>st</i>	Бак-накопитель
<i>STES</i>	Сезонный аккумулятор теплоты
<i>WHP</i>	Водонагревательная установка
<i>Аббревиатуры</i>	
BU	Водонагревательная установка
CAT	Сезонный аккумулятор теплоты

Модель работы сезонного аккумулятора теплоты

Математическая модель для исследования эффективности работы CAT включает двухконтурную гелиосистему с солнечным коллектором, водяным баком-накопителем теплоты суточного цикла работы и аккумулятором с грунтовым теплоизолированным массивом (рис. 1). Аналогичная модель рассматривалась в работе [21]. Период накопления теплоты характеризуется повышением средней по объему температуры аккумулятора и определяется тепловой энергией, поступающей от водонагревательной уста-

новки (BU) с учетом тепловых потерь через теплоизоляцию:

$$(c_p \rho V_s) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} = Q_{WHP} - Q_{los} = F_{sc} \cdot q(\tau) \cdot \eta_{WHP} - k \cdot \Theta \cdot S_s, \quad (1)$$

$$\eta_{WHP} = \eta_{sc}(\tau) \eta_{st} \eta_{pipe}, \quad (2)$$

где $(c_p \rho V_s)$ – теплоемкость, плотность и объем грунтового аккумулятора; $\Theta(\tau)$ – разность среднеобъемной температуры аккумулятора и окружающего

грунта; $q(\tau)$ – интенсивность солнечной радиации на поверхности солнечного коллектора; F_{sc} – площадь коллектора; η_{WHP} – КПД водонагреваемой установки, включающей КПД коллектора, бака-накопителя и соединительных трубопроводов; k – коэффициент теплопередачи через теплоизоляцию; S_s – наружная площадь поверхности аккумулятора.

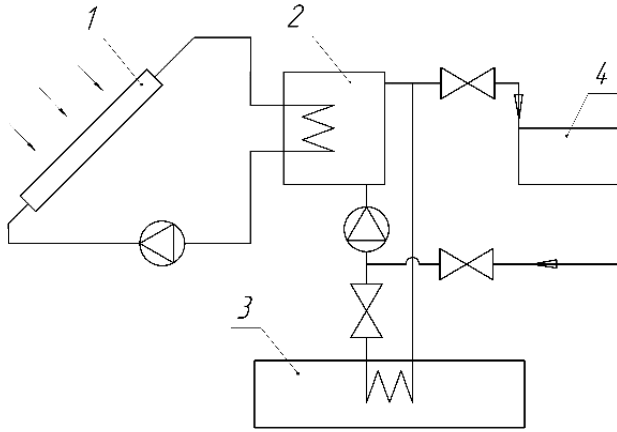


Рис. 1 – Принципиальная схема гелиосистемы с сезонным аккумулятором теплоты: 1 – солнечный коллектор; 2 – промежуточный бак-накопитель; 3 – сезонный накопитель теплоты; 4 – потребитель

Fig. 1 – A schematic of the solar system with a seasonal heat accumulator: 1 – solar collector; 2 – intermediate storage tank; 3 – seasonal heat storage device; 4 – consumer

С помощью теоремы о «среднем» при вычислении интеграла от произведения функций, зависящих от времени τ , изменение температуры аккумулятора можно представить в виде:

$$\Theta(\tau) \approx BA \int_0^{\tau} Q_{WHP}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где

$$B = F_{sc} \cdot (c_p \rho V_s); \quad (4)$$

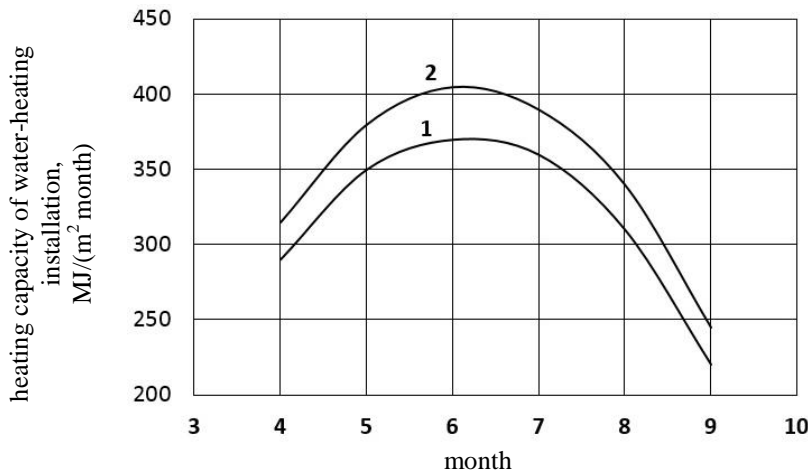


Рис. 2 – Удельная теплопроизводительность водонагревательной установки САТ с вакуумным коллектором в течение летних месяцев в г. Екатеринбурге: 1 и 2 – при средней температуре теплоносителя $T_k = 75^\circ\text{C}$ и 50°C соответственно

Fig. 2 – Unit heating capacity water-heating installation SAT with vacuum collector during the summer months (Yekaterinburg): 1 and 2 – with average temperature of coolant $T_k = 75^\circ\text{C}$ and 50°C respectively

$$A = \exp \left[-\frac{0,5 \cdot k \cdot S_s}{(c_p \rho V_s)} \cdot \tau \right]; \quad (5)$$

$$Q_{WHP}(\tau) = q(\tau) \cdot \eta_{WHP}(\tau), \quad (6)$$

где $Q_{WHP}(\tau)$ – изменение удельной тепловой мощности ВУ в течение светового дня.

Бак-накопитель и соединительные трубопроводы считаются хорошо теплоизолированными, что позволяет выразить теплопроизводительность водонагревательной установки за летний период в виде:

$$Q_{WHP}^N = \sum_1^N (Q_i \cdot \eta_i)^{month}, \quad (7)$$

где Q_i и η_i – месячные значения интенсивности солнечной радиации и соответствующие значения КПД коллектора за этот период.

Эффективность солнечного коллектора определяется следующим образом:

$$\eta_i^{month} = \eta_0 - 1,33 \frac{\Delta T_i}{q} - 0,007 \frac{\Delta T_i^2}{q}, \quad (8)$$

где q – интенсивность солнечной радиации на 1 м^2 поверхности коллектора; η_0 – оптический КПД коллектора; ΔT_i – среднемесячная разность температур теплоносителя в коллекторе и наружного воздуха.

Результаты расчетных исследований эффективности сезонного аккумулятора теплоты с солнечным коллектором

На рис. 2 приведены расчетные значения теплопроизводительности водонагревательной установки с коллектором на вакуумных трубках ($\eta_0 = 0,7$), ориентированным на юг с углом к горизонту 56° северной широты. В расчетах использованы климатические данные метеостанции г. Екатеринбурга [22].



Для того чтобы оценить теплопотери аккумулятора, представим его в виде прямоугольного параллелепипеда с одинаковыми сторонами и высотой, равной половине их длины. В этом случае связь между площадью поверхности S_s и объемом V_s определяется простым соотношением:

$$S_s = 6,35 \cdot V_s^{0,67}. \quad (9)$$

Кондуктивные теплопотери аккумулятора в окружающий грунт зависят от термических сопротивлений самой изоляции k_{insul} и на ее границах с грунтом R_{soil} [14]:

$$k = (R_{insul} + 2R_{soil})^{-1} = \left[\frac{\delta_{insul}}{\lambda_{insul}} + 0,75(\pi\lambda_{soil}V_s^{0,33})^{-1} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где δ_{insul} – толщина слоя изоляции; λ_{insul} и λ_{soil} – коэффициенты теплопроводности изоляции и грунта (0,04 Вт/(м·К) и 0,8 Вт/(м·К)) [23].

При толщине изоляции $\delta_{insul} = 0,5$ м значение $k = 0,08$ Вт/(м²·К) и практически не меняется при $V_s = 50 \div 500$ м³.

Следует отметить, что в модели зарядки/разрядки грунтового аккумулятора не рассматриваются конструктивные и режимные параметры внутреннего теплообменного устройства, поскольку среднеинтегральная температура массива в данном случае определяется теплопроизводительностью ВУ и выбранным объемом аккумулятора.

С помощью данных удельной производительности водонагревательной установки (см. рис. 2) и соответствующих выражений (3), (7), и (10) получены расчетные зависимости конечной температуры нагрева аккумулятора САТ в зависимости от его объема и продолжительности зарядки в течение одного, трех и шести летних месяцев для климатических условий Екатеринбурга (рис. 3).

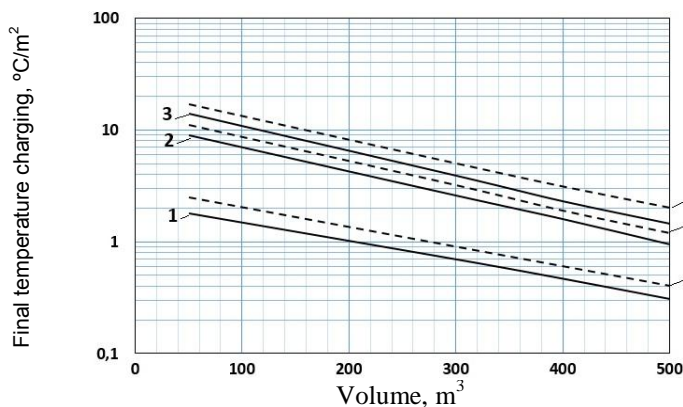


Рис. 3 – Конечная температура зарядки САТ в расчете на 1 м² площади солнечного коллектора (г. Екатеринбург):

1, 2, 3 и 1', 2', 3' – продолжительность зарядки в течение одного, трех и шести летних месяцев при $T_k = 75$ °C и 50 °C соответственно

Fig. 3 – The final temperature of STES charging per square meter of solar collector area (Yekaterinburg): 1, 2, 3 and 1', 2', 3' is the charging time during one, three, and six summer months at $T_k = 75$ °C and 50 °C respectively

Как показано на рис. 3, при $V_s = 300$ м³ размеры сторон аккумулятора составляют 8,4 м при высоте 4,2 м, при этом для нагрева САТ за летний период (6 месяцев) до температуры $\Theta = 65$ °C требуется площадь солнечного коллектора $F_{sc} = 32$ м², а для $V_s = 500$ м³ – площадь коллектора 75 м².

Следует отметить, что в расчетах температура окружающего аккумулятор грунта принималась постоянной и равной 10 °C.

Работа сезонного аккумулятора тепла в отопительный период

Количество тепловой энергии, которое может храниться в САТ и в дальнейшем использоваться для отопления, определяется конечной температурой аккумулятора в результате его зарядки и минимальной температурой хранения, обычно принимаемой равной температуре окружающего грунта 8 ÷ 12 °C. Тепловые потери в этот период обусловлены кондуктивным теплообменом аккумулятора через слой изоляции.

Работа САТ в период разрядки при фиксированной отопительной нагрузке отвечает уравнению:

$$(c_p \rho V_{STES}) \cdot \frac{d\Theta}{dt} + k\Theta S_{STES} = -Q_{hl}, \quad (11)$$

где $\Theta(t)$ – избыточная температура массива аккумулятора по отношению к температуре окружающего грунта; Q_{hl} – значение отопительной нагрузки в зимний период.

Продолжительность работы САТ при выбранной отопительной нагрузке в режиме прямого отопления (без теплового насоса) определяется следующим образом:

$$\tau = (c_p \rho)_{STES} \cdot k^{-1} \left(\frac{S_{STES}}{V} \right)^{-1} \cdot \ln \left(\frac{(1+a)}{\left(\frac{\Theta}{\Theta_0} + a \right)} \right), \quad (12)$$

$$a = \frac{Q_{hl}}{\Theta_0} \cdot (k \cdot S_{STES})^{-1}, \quad (13)$$



где Θ – конечная температура охлаждения САТ при разрядке; Θ_0 – максимальная температура аккумулятора при зарядке.

Анализ полученных результатов для условий напольного отопления

При анализе уравнения (12) температурный режим работы САТ выбирался для условий напольного отопления («теплый пол»). Особенностью системы является пониженная температура подаваемого теплоносителя (не выше 45 °С). Поддержание требуемой температуры осуществляется за счёт подмешивания обратной воды в системе отопления.

Кроме того, рассматривался вариант с минимальной температурой охлаждения аккумулятора до 35 °С для случая прямого нагрева пола циркулирующим теплоносителем и охлаждение до температуры ок-

ружающего грунта 10 °С с дублирующим источником теплоты или тепловым насосом.

На рис. 4 приведены расчетные значения продолжительности работы САТ в зависимости от тепловой нагрузки на отопление по отношению к максимальной температуре зарядки для двух режимов разрядки аккумулятора. Примером может служить индивидуальный дом с напольным отоплением общей площадью 800 м² и отапливаемой площадью 70 м², для которого требуется тепловая мощность 8,4 кВт. Максимальная продолжительность работы составляет 120 суток при температуре зарядки 90 °С в летний период и объеме 500 м³; в режиме полной разрядки до 10 °С продолжительность работы составляет 220 суток. С ростом отопительной нагрузки при ограниченной максимальной температуре нагрева САТ (60 ÷ 90 °С) продолжительность работы значительно снижается.

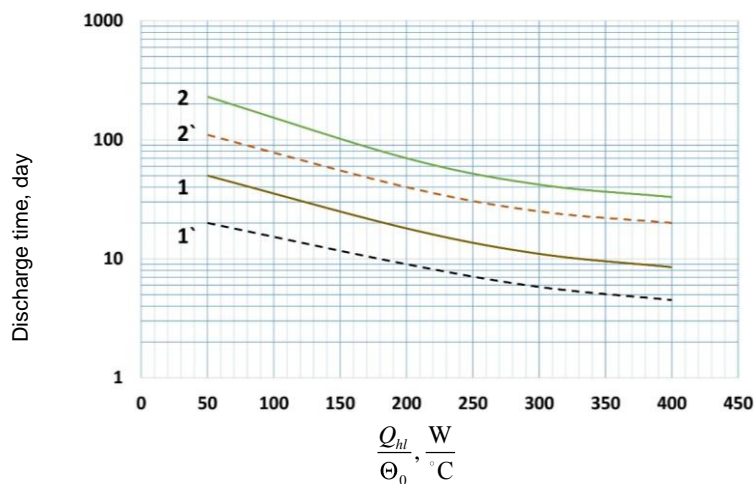


Рис. 4 – Продолжительность разрядки САТ в режимах полной разрядки (1, 2) и разрядки до 35 °С (1', 2') с объемом аккумулятора 100 м³ и 500 м³

Fig. 4 – STES discharge time in the modes of complete discharge (1, 2) and discharge to 35 °С (1', 2') with the storage capacity of 100 m³ and 500 m³

Предложенная методика расчета гелиосистемы с сезонными аккумуляторами теплоты позволяет оценить необходимую площадь СК, температурные режимы зарядки и разрядки САТ вместе с основными геометрическими параметрами системы. Методика может применяться для любых грунтов, а также для расчета характеристик систем аккумуляции тепловой энергии для накопительных сред, отличающихся от естественного грунта теплофизическими характеристиками (талькохлорит, талькомагнезит, солевые композиции, парафин и пр.) [8, 17, 20].

Заключение

Применение грунтовых аккумуляторов теплоты является достаточно простым и малозатратным способом переноса во времени (с летнего на зимний период) тепловой энергии солнечного излучения, который позволяет существенно сократить затраты органического топлива на обогрев помещений в отопительный период.

Наибольшая эффективность использования аккумулярованной в грунте энергии достигается за счёт

низкотемпературных систем обогрева (теплый пол, воздушное отопление). Данная технология аккумулярования может с успехом применяться и для поддержания благоприятного температурного режима в плавательных бассейнах и сельскохозяйственных сооружениях закрытого грунта.

Список литературы

- [1] Kuravi, S. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants [Text] / S. Kuravi [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2013. – Vol. 39. – Iss. 4. – P. 285–319.
- [2] Zhang, H. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects [Text] / H. Zhang [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2016. – Vol. 53. – P. 1–40.
- [3] Tian, Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications [Text] / Y. Tian, C. Y. Zhao // Applied Energy. – 2013. – Vol. 104. – P. 538–553.
- [4] Liu, L. Thermal equilibrium research of solar seasonal storage system coupling with ground-source

heat pump [Text] / Long Liu, Neng Zhu, Jing Zhao // *Energy*. – 2016. – Vol. 99. – P. 83–90.

[6] Guruprasad Alva. An overview of thermal energy storage systems [Text] / Guruprasad Alva, Yaxue Lin, Guiyin Fang // *Energy*. – 2018. – Vol. 144. – P. 341–378.

[7] Xu, J. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage [Text] / J. Xu, R.Z. Wang, Y. Li // *Sol. Energy*. – 2014. – Vol. 103. – P. 610–638.

[8] Guruprasad Alva. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications [Text] / Guruprasad Alva, Lingkun Liu, Xiang Huang, Guiyin Fang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 68. – Part 1. – P. 693–706.

[9] Bauer, D. German central solar heating plants with seasonal heat storage [Text] / D. Bauer [et al.] // *Sol. Energy*. – 2010. – Vol. 84. – P. 612–623.

[10] Benli, H. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating [Text] / H. Benli, A. Durmus // *Sol. Energy*. – 2009. – Vol. 83. – P. 2109–2119.

[11] Benli, H. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating / H. Benli // *Energy Convers. Manage.* – 2011. – Vol. 52. – P. 581–589.

[12] Berroug, F. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall [Text] / F. Berroug [et al.] // *Energy Build.* – 2011. – Vol. 43. – P. 3027–3035.

[13] Satu Paiho. Energy and emission analyses of solar assisted local energy solutions with seasonal heat storage in a Finnish case district [Text] / Satu Paiho, Ha Hoang, Mari Hukkalainen // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 107. – P. 147–155.

[14] XiaoWang. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas [Text] / XiaoWang [et al.] // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – Iss. 11. – P. 2104–2110.

[15] Belén Zalba. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications [Text] / Belén Zalba [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2003. – Vol. 23. – Iss. 3. – P. 251–283.

[16] Atul Sharma. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [Text] / Atul Sharma [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 318–345.

[17] Анисимов, А. Энергосберегающие отопительные приборы из Карелии (теплоаккумуляторы) [Текст] / А. Анисимов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ)*. – 2004. – № 5. – С. 44–46.

[18] Высочин, В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла [Текст] / В.В. Высочин // *Труды Одесского политех-*

нического университета. – 2011. – Вып. 2 (36). – С. 125–129.

[19] Высочин, В.В. Влияние размеров сезонного аккумулятора тепла на автономность работы гелиосистемы [Текст] / В. В. Высочин // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2012. – Вып. 1 (36). – С. 129–132.

[20] Бекман, Б. Тепловое аккумулирование энергии [Текст] / Б. Бекман, П. Гилли. – Пер. с английского. М.: изд. Мир, 1987. – 272 с.

[21] Kroll, J.A. The use of ground heat storages and evacuated tube solar collectors for meeting the annual heating demand of family-sized houses [Text] / J.A. Kroll, F. Ziegler // *Solar Energy*. – 2011. – Vol. 85. – Iss. 11. – P. 2611–2621.

[22] Научно-прикладной справочник по климату СССР: серия 3 многолетние данные, части 1–6, выпуск 9 Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области, Башкирская АССР, Гидрометеоздат, Ленинград, 1990. – 557 с.

[23] Пехович, А.И. Расчет теплового режима твердых тел [Текст] / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Ленинград: Энергия, 1976. – 352 с.

[24] Nemš, M. Validation of a new concept of a solar air heating system with a long-term granite storage bed for a single-family house [Text] / M. Nemš [et al.] // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 215. – P. 384–395.

[25] Reyes, A. Design and evaluation of a heat exchanger that uses paraffin wax and recycled materials as solar energy accumulator [Text] / A. Reyes [et al.] // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – Vol. 88. – P. 391–398

References

[1] Kuravi S., Trahan J., Goswami D.Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013;39(4):285–319.

[2] Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degreè J., Lv Y. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016;53:1–40.

[3] Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 2013;104:538–553.

[4] Long Liu, Neng Zhu, Jing Zhao. Thermal equilibrium research of solar seasonal storage system coupling with ground-source heat pump. *Energy*, 2016;99:83–90.

[5] Kharchenko N.V. Individual solar installation (Individual'nye solnechnye ustanovki). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991 (in Russ.).

[6] Guruprasad Alva, Yaxue Lin, Guiyin Fang. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 2018;144:341–378.



- [7] Xu J., Wang R.Z., Li Y. An overview of thermal energy storage systems. *Sol. Energy*, 2014;103:610–638.
- [8] Guruprasad Alva, Lingkun Liu, Xiang Huang, Guiyin Fang. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;68(1):693–706.
- [9] Bauer D., Marx R., Nußbicker-Lux J., Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H. German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Sol. Energy*, 2010;84:612–623.
- [10] Benli H., Durmus A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. *Sol. Energy*, 2009;83:2109–2119.
- [11] Benli, H., Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating. *Energy Convers. Manage.*, 2011;52:581–589.
- [12] Berroug F., Lakhel E.K., El Omari M., Faraji M., El Qarnia H. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy Build.*, 2011;43:3027–3035.
- [13] Paiho S., Hoang H., Hukkalainen M. Energy and emission analyses of solar assisted local energy solutions with seasonal heat storage in a Finnish case district. *Renewable Energy*, 2017;107:147–155.
- [14] Wang X., Zheng M., Zhang W., Zhang S., Yang T. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas. *Energy and Buildings*, 2010;42(11):2104–2110.
- [15] Zalba B., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2003;23(3):251–283.
- [16] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009;13(2):318–345.
- [17] Anisimov A. Energy-efficient heating appliances from Karelia (thermal receivers). (Energoberegayushchie otopitel'nye pribory iz Karelii (teploakkumulyatory). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2004;5(10):44–46 (in Russ.).
- [18] Vysochin V.V. Mathematical model of solar collectors with seasonal heat accumulator (Matematicheskaya model' geliosistemy s sezonnym akkumulyatorom tepla). *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011;2(36):125–129 (in Russ.).
- [19] Vysochin V.V. Influence of seasonal heat battery sizes at the battery life of the solar system (Vliyaniye razmerov sezonnogo akkumulyatora tepla na avtonomnost' raboty geliosistemy). *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012;1(36):129–132 (in Russ.).
- [20] Beckmann G., Gilli P. Thermal energy storage (Teplovoye akkumulirovaniye energii). Moscow: Mir Publ., 1987 (in Russ.).
- [21] Kroll J.A., Ziegler F. The use of ground heat storages and evacuated tube solar collectors for meeting the annual heating demand of family-sized houses. *Sol. Energy*, 2011;85(11):2611–2621.
- [22] Scientific-applied climate guide USSR // 3 perennial data series, parts 1–6, no. 9 Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk, Kurgan region, Bashkir Autonomous Soviet Socialist Republic (Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR // seriya 3 mnogoletnie dannye: Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya, Kurganskaya oblasti, Bashkirskaya ASSR), Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990 (in Russ.).
- [23] Pekhovich A.I. Thermal calculation of solids (Raschet teplovogo rezhima tverdykh tel). Leningrad: Energiya Publ., 1976 (in Russ.).
- [24] Nemš M., Kasperski J., Nemš A., Bać A. Validation of a new concept of a solar air heating system with a long-term granite storage bed for a single-family house. *Applied Energy*, 2018;215:384–395.
- [25] Reyes A., Negrete D., Mahn A., Sepúlveda F. Design and evaluation of a heat exchanger that uses paraffin wax and recycled materials as solar energy accumulator. *Energy Conversion and Management*, 2014;88:391–398.

Транслитерация по BSI