Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 539.21:537.31

Моделирование накопления солнечной энергии в грунтовом аккумуляторе

Юлдашев З.Ш.[1], Шоёкубов Ш.Ш.[1], Злобина С.И.[2]

[1]ФТИ имени С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана

[2]Государственный аграрный университет Северного Зауралья

Аннотация

Тематика работы отвечает постановлению Правительства Республики Таджикистан от 01.03.2023, №51 «О программе возобновляемых источников энергии на 2023-2027 годы» и направлена на решение важнейших задач по устойчивому энергообеспечению труднодоступных горных районов Республики Таджикистан. Путем математического моделирования исследован тепловой потенциал тепличной конструкции арочного типа для зарядки солнечного грунтового аккумулятора солнечного тепла.

Ключевые слова: СОЛНЕЧНАЯ ИНСОЛЯЦИЯ, ЭНЕРГИЯ, ТЕПЛИЧНАЯ КОНСТРУКЦИЯ, ГРУНТОВЫЙ АККУМУЛЯТОР, СОТОВЫЙ ПОЛИКАРБОНАТ

Целью работы являлось исследование теплового потенциала тепличной конструкции ангарного типа для зарядки солнечного грунтового аккумулятора солнечного тепла (СГАСТ), с учетом климата, характерного для г. Душанбе на май – август, при значениях средней температуры $t_н$ =34,5°С и средне-суточной солнечной инсоляции A_C = 6975,4 Вт/м^2, которые измерялись для прямой и рассеянной суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность с учетом условий облачности.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Результаты исследования

Полученные путем математического моделирования результаты показывают, что тепличная конструкция ангарного типа с радиусом кривизны R=12 м, углом α = 90°, выстой h= 3,51 м, длиной хорды C=17 м, длиной дуги L=18,84 м, боковой площадью $S_б$=41,04 м^2 и длиной M=17,64 м обеспечит зарядку СГАСТ в течение четырёх месяцев. Накопленная тепловая мощность выдержит тепловую нагрузку 75,347 МВт*ч, с учетом потери тепла в грунтовом аккумуляторе. Математическая модель позволяет вычислить параметры тепличной конструкции ангарного типа для произвольной тепловой нагрузки.

Введение

Трудности решения экологических и социально-экономических проблем, а также повышение цен на энергоресурсы вынуждает нас искать новые источники энергии. Последние 15-20 лет в ряде европейских и североамериканских стран успешно функционируют энергосистемы с грунтовыми сезонными аккумуляторами солнечного тепла [1, 2]. В этих системах, в качестве преобразователя солнечного излучения в тепло, используются солнечные коллекторы разной конструкции с двойным контуром, а также энергоактивные ограждающие конструкции у которых КПД не более 40% [3, 4]. Эти страны географически расположены за 50° северной широты, где наблюдается очень суровый континентальный климат. Подобные энергосистемы могут сохранять тепло, а также обеспечивать жилищные и производственные помещения горячей водой круглый год.

<u>Климатические преимущества Таджикистана:</u>

1) продолжительность солнечного дня;

2) повышенная солнечная инсоляция;

3) положительное среднее значение температуры в зимнее время года;

4) повышенная температура изотермического слоя Земли.

Вышеперечисленные преимущества позволят нам сделать новый шаг в области использования солнечной энергетики. Вместо дорогостоящих солнечных коллекторов, исследуется возможность использования теплиц ангарной конструкции с сотовым поликарбонатным покрытием. Во-первых, наличие тепличной конструкции (ТК) над

грунтовым аккумулятором уменьшит потерю тепла из аккумуляторного массива на 10-15%. Во-вторых, данная солнечная энергетическая система позволит дополнительно заниматься растениеводством и в зимнее время. В-третьих, избавит нас от использования многочисленных опорных конструкций и коммуникационных систем. Например, для обеспечения горячей водой и отоплением площади 100 м^2 жилья для одной семьи (5 человек) потребуется 32 м^2 вакуумных трубчатых солнечных коллекторов, не говоря уже о теплообменниках и сложной линии коммуникационной конструкции с двойными контурами для теплообмена между солнечными коллекторами и грунтовым аккумулятором [5-8].

Главным теплофизическим параметром ТК, при зарядке СГАСТ, является эффективное пропускание и удержание солнечного излучения в виде тепла, которое теряется при зарядке грунтового аккумуляторного массива.

Математической моделью для изучения эффективности функционирования ТК может служить теплица ангарной конструкции с одноконтурным теплообменником. Поперечное сечение такой конструкции представляет собой сегмент окружности радиусом R, углом α, с выбранной высотой h, длиной хорды C, длиной дуги L и длиной теплицы M. Контур теплообменника состоит из вентилятора с закрытой камерой, коаксиальных теплообменников, расположенных в скважинах САТ и блок-контролера с термодатчиками (рис. 1).

Для обеспечения горячей водой и отоплением, параллельно с коаксиальными теплообменниками, ставится U-образная пластиковая 20мм труба. Режим циркуляции воды управляется отдельным контроллерным блоком.

Из верхней части ТК теплый воздух всасывается с помощью вентилятора через пластиковые трубы. Воздух, проходя массив грунтового аккумулятора, выдувается в нижнюю часть ТК. Процесс циркуляции теплого воздуха сопровождается теплообменом. Тепло передается грунтовому массиву. Количество тепла, накапливаемое в СГАСТ, определяется количеством тепла выдаваемой ТК в период зарядки с учетом частичной ее потери. Такая система для синхронного обеспечения теплообмена между ТК и СГАСТ не требует двойного контура и двойного контроля для достижения эффективной работы теплообменников.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

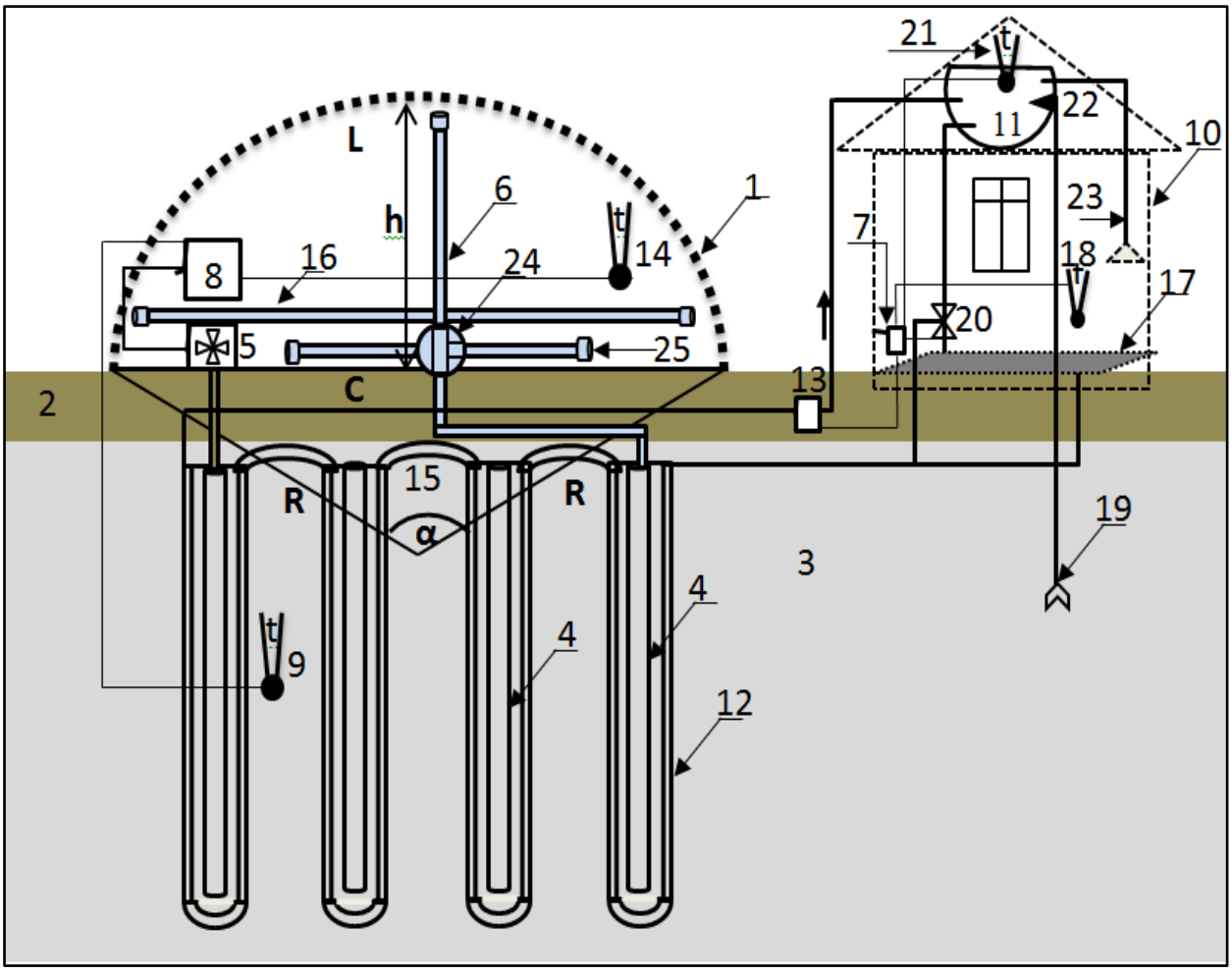

Рис.1. Схема гелиосистемы с тепличной конструкции для зарядки сезонного аккумулятора тепла

Примечание: 1 - тепличная конструкция, 2 - плодородный слой грунта, 3 - сезонный грунтовый аккумулятор солнечного тепла, 4 - коаксиальный теплообменник, 5 - вентилятор, 6 - трубопровод, 7 - двухканальный блок контроля, 8 - электронный блок управления, 9 - датчик температуры грунта, 10 - потребителя тепла, 11 - накопительная емкость, 12 - U-образный теплообменник, 13 - водяной насос, 14 - датчик температуры, 15 - перемычки, 16 - нижний трубопровод, 17 - теплообменник, 18 - датчик температуры помещения, 19 - водопроводная линия, 20 - электроклапан, 21 - датчик температуры холодной воды, 22 - гидромеханический клапан, 23 - трубопровод горячей воды, 24 - вентиль, 25 - нижний распределительный трубопровод.

Математическая модель и её обсуждение

Дневную теплофизическую характеристику можно выразить с помощью уравнения теплового баланса ТК:

$$Q = S_{эф}\left[A_c I_s - \frac{12S_ф}{S_{эф}}(k_1 + k_2)\Delta t\right], \qquad (1)$$

где: Q - полезная тепловая мощность, накапливаемая в течение дня внутри ТК; A_c – суммарная дневная солнечная инсоляция; I_s – оптическая проницаемость покрытия; $S_ф$ = LM+2$S_б$ = αRM+R^2(α-Sinα) = R[Mα+R(α-Sinα)] – физическая площадь покрытия ТК; $S_{эф}$= CM = 2MRsin(α/2) – эффективная площадь теплицы; k_1– коэффициент теплопотери материала покрытия [4]; k_2 – коэффициент инфильтрации и теплопотери излучением [5]; Δt = $t_в$ -$t_н$ – разность внутренней и наружной температур. Формулу (1) для произвольной ТК ангарного типа можно написать в универсальном виде:

$$Q = 2RM\sin\frac{\alpha}{2}\left(A_c I_o - \frac{6[\alpha M + R(\alpha - \mathrm{Sin}\alpha)]}{M\sin\frac{\alpha}{2}}(k_1 - k_2)\Delta t\right). \qquad (2)$$

После соответствующей постановки и преобразования формулы (2), получаем уравнение теплового баланса для ТК ангарного типа с выбранными параметрами. Для вычисления среднедневной накапливаемой тепловой мощности в объёме конкретного ТК выбраны следующие параметры: R=12 м, α = 90°, h= 3,51 м, C=17 м, L=18,84 м, $S_б$ = 41,04 м^2, I_s = 0,85 и M=17,64 м.

$$Q = 300[A_c I_s - 16{,}62(k_1 + k_2)\Delta t]. \qquad (3)$$

Коэффициент теплопотери, согласно данным производителя, составляет k_1=3,9 Вт/м^2°C (сотовый поликарбонат 4 мм), а коэффициент потери излучением и инфильтрацией равен k_2 = 2 Вт/м^2°C.

Таким образом, аналитическим путем, можно вычислить дневную тепловую эффективность данной конструкции в разных стадиях зарядки грунтового массива СГАСТ. При отрицательных значениях Δt оба коэффициента работают в сторону накопления тепловой мощности внутри ТК. Температура внутри ТК зависит как от солнечной инсоляции, так и от скорости потока теплообмена во время зарядки СГАСТ. При зарядке СГАСТ наблюдается медленный рост температуры внутри ТК. Это обусловлено тем что, низкая температура изотермического слоя грунтового, аккумулятора составляющая 17-18°C, способствует ТК работать с максимальным КПД (рис. 2).

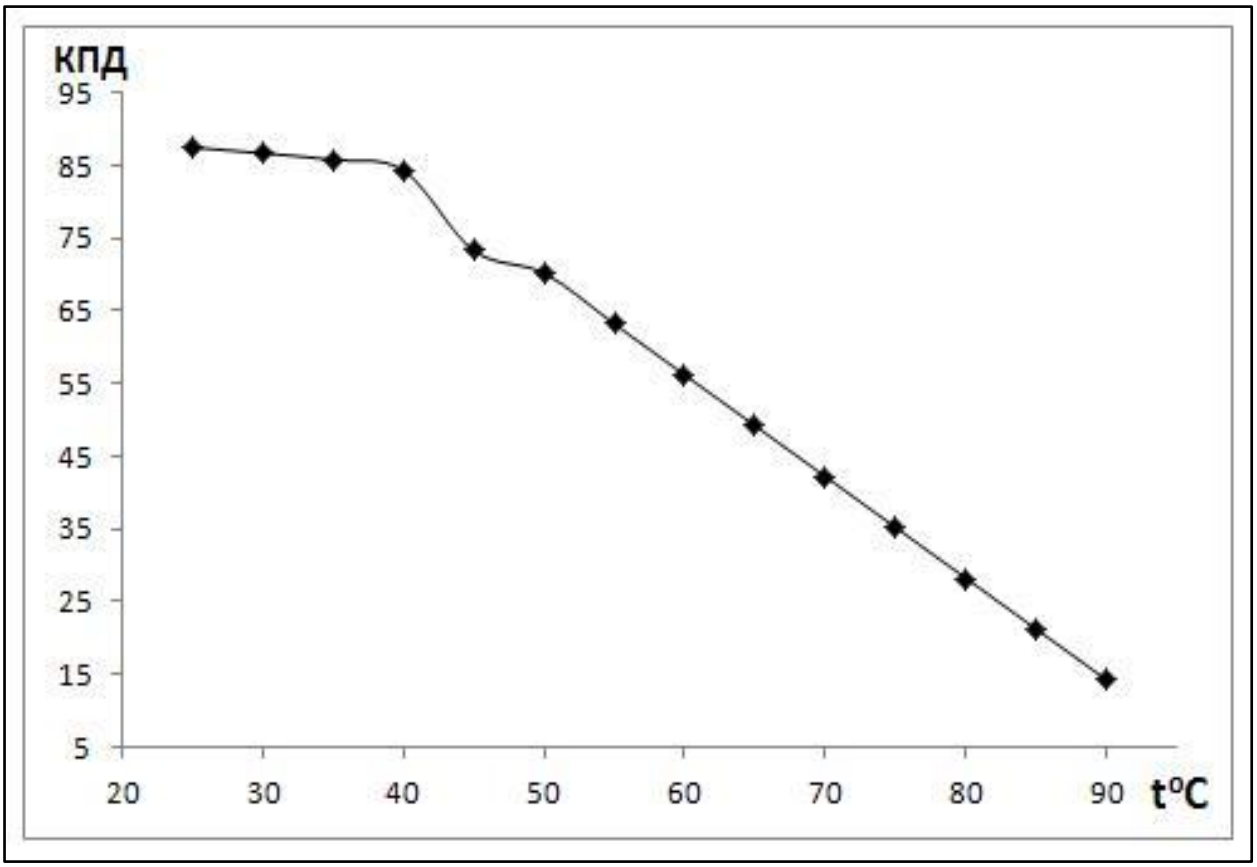

Рис.2. Зависимости КПД ТК ангарного типа от внутренней температуры в течение четырех летних месяцев

Только в конце цикла зарядки грунтового аккумулятора наблюдается повышение температуры ТК и СГАСТ, что приводит к спаду КПД ТК.

Максимальная внутренняя температура теплицы в конце зарядки наступает при достижении термодинамического равновесия, то есть количество тепла собранное и потерянное через покрытия ТК и СГАСТ будет одинаковым. Вычисления суточных теплофизических характеристик солнечной теплицы ангарной конструкции, покрытые сотовым поликарбонатом толщиной 4 мм, для зарядки сезонного грунтового аккумулятора проведены с учётом среднедневных данных температуры и солнечной инсоляцией, характерных для г. Душанбе на май – август месяцы, при значениях $t_н$ =34,5°С и A_C = 6975,4 Вт/м^2, которые измерялись для прямой и рассеянной суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность с учетом условий облачности (табл. 1) [6, 9].

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Таблица 1. Зависимость дневной выработки энергии и потерь энергии от температуры

$Q_{пол.\ кВт}$	$Q_{пот.\ кВт}$	$t_в$ (°C)	Δt (°C)	КПД ТК
2038,8	+425,0	20	-14,5	0,875
2057,2	+278,4	25	-9,5	0,867
1910,7	+131,9	30	-4,5	0,843
1764,2	-14,6	35	-0,5	0,733
1535,2	-161,2	40	5,5	0,702
1471,0	-307,7	45	10,5	0,632
1324,4	-454,3	50	15,5	0,562
1177,9	-600,8	55	20,5	0,492
1031,3	-747,4	60	25,5	0.422
884,8	-893,9	65	30,5	0,422
738,2	-1040,4	70	35,5	0,352
591,6	-1187,1	75	40,5	0,282
445,1	-1333,6	80	45,5	0,212
289,5	-1480,2	85	50,5	0,142
152,0	-1626,7	90	55,5	0,072

Из таблицы 1 видно, что при внутренней температуре ($t_в$) ТК 20°C, дневная тепловая вырабатываемая энергия ($Q_{пол}$) достигает 2038,8 кВт*ч при КПД 0,875, а при 80°C количество полезной энергии снизится до 445,1 кВт*ч, и количество потерянной энергии ($Q_{пот}$) составит 1333,6 кВт*ч, соответственно КПД уменьшится до 0,212.

Механизм зарядки и разрядки грунтового аккумулятора при теплообмене между ТК и СГАСТ в данной работе не рассматривается, поскольку накапливаемая тепловая мощность определяется теплопроизводительностью ТК.

Для оценки количества тепловой мощности накапливаемое в СГАСТ достаточно использовать усредненное значение среднедневной накапливаемой тепловой энергии ($Q_{ср}$ =1318,26 кВт*ч) в ТК. Если период зарядки СГАСТ 4 месяца, то при усреднённом значении тепловой эффективности ТК, аккумулируемое тепло в СГАСТ без учета потери составит:

$$Q_{САТ} = 123Q_{ср} = 162146{,}14\ кВт * ч. \qquad (4)$$

Зная потенциал тепловой мощности, исходную и конечную температуру грунта, находим объём грунтового массива по формуле W=CρVΔt, где W-удельная тепловая мощность СГАСТ в течение четырёхмесячной зарядки, C-теплоемкость грунта (1 кДж/кг°C), ρ- плотность грунта (1500 кг/м^3), $\Delta t = t_и - t_п$ – результативная температура относительно первоначальной температуры грунтового массива. Если исходная

температура 17°С (температура изотермического слоя почвы г. Душанбе и его окрестностей), при зарядке СГАСТ до 80°С, потребуется объем грунтового массива V=6176,99 м^3 с глубиной скважины 20,58 м. Максимальное количество тепловой энергии, которое может извлекаться из СГАСТ, зависит от максимальной и минимальной температур хранения на протяжении сезонного цикла. Если минимальная пригодная температура 30°С, а максимальная 80°С, то извлекаемая тепловая мощность, без учета потери тепла из объёма, СГАСТ будет равна $Q_п = c\rho\Delta t$=128,687 МВт

Коэффициент теплопотери грунтового аккумулятора, имеющего форму параллелепипеда, зависит от термических сопротивлений окружающей грунтовой среды и изоляции, применяемой для покрытия СГАСТ [3, 7]. При значении коэффициента теплопроводности грунта 0,8 Вт/м°С и условной толщиной 2 м, коэффициент теплопотери грунтового массива будет:

$$k = (R_{гр})^{-1} = \left(\frac{\delta г}{\lambda г}\right)^{-1} = 0.4\,\frac{Вт}{м^2 °C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

где: $\delta_г$ –условная толщина слоя $\lambda_г$ - коэффициент теплопроводности грунта. Потеря тепла через верхнюю площадь СГАСТ под покрытием не учитывается, так как тепловая мощность, уходящая с этой поверхности, остается внутри ТК во время ее работы.

С помощью температуропроводности грунта (a=0,003м^2/час), темпа охлаждения$\left(m = \frac{a}{k_ф}\right)$,и коэффициента формы

$\left(k_ф = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_3}\right)^2}\right)$, для СГАСТ имеющего форму параллелепипеда определенного объема, находим время охлаждения СГАСТ без учета тепловой нагрузки при понижения температуры до 30°С [7]:

$$t = \frac{1}{m}\ln\frac{t_{max} - t_п}{t_{min} - t_п} = \frac{1}{2.64x10^{-4}}\ln 4.84 = 5976.06\ час. = 249\ суток \ldots\ldots (6)$$

Продолжительность работы СГАСТ при известной нагрузке (горячее водоснабжение, отопление жилища и теплицы) можно вычислить с помощью формул, приведённых в работах [3, 4]:

$$\tau = c\rho k^{-1}\left(\frac{Sсат}{V}\right)^{-1}\ln\frac{1+a}{\left(\frac{t_{min}}{t_{max}} + a\right)}, \qquad (7)$$

$$\alpha = \frac{Q_о + Q_в + Q_т}{t_{max}} k\,(s_{сат})^{-1}, \qquad (8)$$

где: $Q_о + Q_в + Q_т$–суммарная тепловая нагрузка, $S_{сат}$–площадь сезонного аккумулятора тепла. При суммарной тепловой нагрузке75347кВт (ежедневно 300 литров воды нагретой до температуры 50°С, отопительная нагрузка 4,2 кВт для 50 м^2 жилой площади в течения 150 суток и нагрузка самой теплицы 55296 кВт) с учетом коммуникационной потери, продолжительность работы САТ составит 128 суток. Потерянная тепловая энергия за это время будет; 128,687МВт*ч-75,347МВт*ч=53,347МВт*ч. КПД аккумулятора соответственно будет: 58,5%. КПД самой системы будет ещё ниже. Для сравнения приведем данные других сезонных грунтовых аккумуляторов солнечного тепла: Аннаберг (Швеция), 2010 год, потеря в грунтовом аккумуляторе 387 МВт*ч, полученная полезная энергия 154 МВт*ч. Окотокс (Канада), 2010 год, потеря в грунтовом аккумуляторе 451 МВт*ч, полученная полезная энергия 243 МВт*ч.

Выводы

В работе аналитическим путем. доказана аккумуляция солнечной энергии в грунтовом сезонном аккумуляторе тепла с помощью теплицы ангарной конструкций. Был продемонстрирован ресурс солнечной энергии для центральных районов Республики Таджикистан для аккумуляции в сезонных грунтовых аккумуляторах солнечного тепла. Применение гелиосистемы с ТК для обеспечения горячего водоснабжения, отопления для жилищ и теплиц. является достаточно простым и экономически выгодным. Разработанная солнечная энергосистема с сезонными грунтовыми аккумуляторами дает возможность подобрать необходимую эффективную площадь ТК вместе с оптимальными геометрическими и теплофизическими параметрами. Также было установлено, что данная энергосистема эффективна при низкотемпературных системах обогрева (теплый пол, воздушное отопление).

Список использованных источников:

1. Mesquita L., Mc Clenahan D., Thornton J., Carriere J., Wong B. Drake Landing Solar Community: 10 Years of Operation. ISES Solar World Congress 2017.

2. Kuravi S. Thermal energy storage technologies and system for concentrating solar power plants. - Progress in Energy and Combustion Science, 2013. - Vol. 39, Iss. 4. - P. 285-319.

3. Пахалуев В.М., Щеклеин С.Е., Матвеев Ф.В. Гелиосистема с сезонным аккумулятором теплоты // Международный научный журнал “Альтернативная энергетика и экология” (ISJAEE). - 2018, (01-03). - С. 63-72.

4. Страшко В.В. Совместная работа энергоактивной ограждающей конструкции и грунтового сезонного аккумулятора тепла в режиме зарядки // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. - № 5.

5. Кухтурский А.А. Использование грунтового аккумулятора теплоты емкостного типа // Энергообеспечение и энерготехнологии, Вестник: КрасГАУ. – 2007. - № 4.

6. Солнечная инсоляция в городах России и СНГ – Режим доступа: https://andi-grupp.ru/informatsiya/stati/solnechnaya-insolyatsiya-v-gorodakh-rossi.

7. Юркинский В.П. Теплофизика. – Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2012. - 129 с.

8. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О. Контроль и предотвращение пожаров от токов утечки в электроустановках производственного объекта [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_538.pdf.; DOI: https://doi.org/10.51419/202125538.

9. Shirobokova T., Surinsky D., Egorov S. Modeling of led luminaires with optimal temperature operation of leds // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling. - 2021. - Vol. 174. - No. 529; DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052093.

==========

Цитирование:

Юлдашев З.Ш., Шоёкубов Ш.Ш., Злобина С.И. Моделирование накопления солнечной энергии в грунтовом аккумуляторе [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/2/st_240.pdf. DOI: https://doi.org/10.51419/202132240.