

В. В. ВЫСОЧИН, В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, Н. Г. БЕЛОУСОВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУНТОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ГЕЛИОСИСТЕМ

Исследованы нестационарные процессы теплообмена в гелиосистеме с тепловым насосом и сезонным аккумулятором тепла с 9 грунтовыми вертикальными теплообменниками в процессе периодической, с суточными циклами, зарядки аккумулятора в летний период и разрядки в зимний для различных регионов Украины. Метод исследования – численный. Итерационным методом подбирались условия полного автономного теплоснабжения потребителя по отопительной нагрузке. Обоснована возможность повышения эффективности аккумулятора путем выбора рационального шага куста и температуры теплоносителя в грунтовом теплообменнике. Показано, что при кустовом способе организации сезонного аккумулятора рециркуляция теплоносителя в теплообменниках в период отсутствия солнечной радиации (в пассивной фазе) способствует повышению эффективности закачки тепла в грунт. Граничная скорость теплоносителя на входе в теплообменник в пассивной фазе составляет 0,8 м/с. Такие условия позволяют достичь повышения энтальпии грунта и уменьшения необходимой площади солнечных коллекторов. Этому также способствует рациональная величина температуры теплоносителя на входе в грунтовые теплообменники, которую можно рекомендовать на уровне 50 °С. Рациональные значения шага куста зондов в основном являются функцией теплофизических свойств грунта и могут быть определены по полученной зависимости.

Ключевые слова: сезонный аккумулятор теплоты; гелиосистема; тепловой насос.

В. В. ВИСОЧИН, В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, Н. Г. БЕЛОУСОВА

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГРУНТОВИХ АКУМУЛЯТОРОВ ГЕЛІОСИСТЕМ

Досліджено нестационарні процеси теплообміну в геліосистемі з тепловим насосом і сезонним акумулятором тепла з 9 ґрунтовими вертикальними теплообмінниками в процесі періодичної, з добовими циклами, зарядки акумулятора в літній період і розрядки в зимовий для різних регіонів України. Метод дослідження – чисельний. Ітераційним методом підбиралися умови повного автономного теплопостачання споживача по опалювальному навантаженні. Обґрунтовано можливість підвищення ефективності акумулятора шляхом вибору раціонального кроку куща і температури теплоносія в ґрунтовому теплообміннику. Показано, що при кущовому способі організації сезонного акумулятора рециркуляція теплоносія в теплообмінниках в період відсутності сонячної радіації (в пасивній фазі) сприяє підвищенню ефективності закачування тепла в ґрунт. Гранична швидкість теплоносія на вході в теплообмінник в пасивній фазі становить 0,8 м/с. Такі умови дозволяють досягти підвищення ентальпії ґрунту і зменшення необхідної площі сонячних колекторів. Цьому також сприяє раціональна величина температури теплоносія на вході в ґрунтові теплообмінники, яку можна рекомендувати на рівні 50 °С. Раціональні значення кроку куща зондів в основному є функцією теплофізичних властивостей ґрунту і можуть бути визначені за отриманою залежністю.

Ключові слова: сезонний акумулятор теплоти; геліосистема; тепловий насос.

V. V. WYSOCHIN, V. R. NIKULSHIN, A. E. DENYSOVA, N. G. BILOUSOVA

EFFICIENCY OF SOLAR GROUND THERMAL STORAGE

Non-stationary processes of heat exchange in seasonal solar ground thermal storage with a heat pump and 9 soil vertical heat exchangers, with daily cycles, storage charging in summer and discharging in winter for various regions of Ukraine are investigated. The research method is numerical. The iterative method selected the conditions for the complete autonomous heating. The possibility of increasing the efficiency of thermal storage by selecting a rational step of pipes and the temperature of the coolant in the ground heat exchanger is shown. In the cluster method of a seasonal battery organizing, recirculation of the coolant in heat exchangers in the case of solar radiation absence (in the passive phase) contributes to an increase of heat supply efficiency of the ground. The boundary velocity of the coolant at the entrance of the heat exchanger in the passive phase is 0.8 m/s. Such conditions make it possible to achieve an increase of the ground enthalpy and to reduce the required area of solar collectors. This also contributes to the rational value of the coolant temperature at the entrance of the soil heat exchangers, which can be recommended at 50 °C. The rational step of pipes in cluster is mainly a function of the thermophysical properties of the ground and can be determined from the obtained formula.

Keywords: seasonal thermal storage; solar system; heat pump.

Введение. Задачам энергосбережения и разработке энергоэффективных технологий уделяется существенное внимание как с точки зрения уже достигнутых результатов, так и в планируемых разработках на будущее [1]. При этом рассматриваются возможности совершенствования систем, использующих как возобновляемые, так и традиционные источники энергии [2].

Анализ состояния вопроса. В силу дефицита традиционных энергетических источников в Украине особое внимание уделяется развитию «зеленой энергетики» [3], что, впрочем, является также характерным и для мировой энергетической политики [4, 5]. Среди возобновляемых источников энергии [6] привлекательным для Украины выступает энергия Солнца [7, 8, 9], которая весьма

эффективно применяется в настоящее время для различных целей [10, 11–19], в том числе и в системах генерации и использования теплоты [20–23]. Гелиосистемы отопления используют сезонные аккумуляторы тепла. Наиболее пригодны для этой цели грунтовые аккумуляторы [24, 25], состоящие из вертикальных многозондных конструкций. Зонды представляют собой трубчатые теплообменники, расположенные в скважинах. Режимы работы теплообменников – температурный и скоростной, отличаются существенной нестационарностью, обусловленной влиянием сопряженных гелиосистемы и потребителя.

© Высочин В.В., Никульшин В.Р., Денисова А.Е., Белоусова Н.Г., 2019

В настоящее время отсутствуют надежные рекомендации по выбору рациональных параметров работы комплексов гелиосистема – многозонный сезонный аккумулятор, в частности, скоростей движения теплоносителей в грунтовых теплообменниках, размеров куста зондов и их температурного режима.

Одним из факторов сдерживания применения грунтовых аккумуляторов является невысокое качество накопленной теплоты, ее низкий потенциал. Это объясняется, в частности, цикличностью производства теплоты в гелиосистеме, что приводит к периодическому падению температурного напора при зарядке аккумулятора и размыванию температурного поля в грунте [24]. Для решения этой проблемы применяют дополнительные аккумуляторы тепла суточного цикла [26], что усложняет систему теплоснабжения и ухудшает ее показатели. Простой, но эффективный способ сглаживания процесса аккумуляции тепла заключается в активизации работы грунтового теплообменника в ночное время в так называемой пассивной фазе [24]. Для многозонных аккумуляторов подобных исследований не проведено. Важно отметить, что численные исследования известных авторов работы грунтовых аккумуляторов проводились на математических моделях, в которых использовалось одномерное уравнение теплопроводности грунта и при отсутствии влияния сопряженных элементов системы [26, 27]. Такая постановка задачи позволяла проводить лишь качественную оценку процессов, так как в реальных условиях имеет место существенная деформация температурного поля в массиве грунта [24], обусловленная утечками тепла в разных направлениях и наложениями полей от разных источников. Так как для практических целей важно установление в высокой степени достоверных режимных параметров, необходимо производить решение таких задач с применением математических моделей более высокой точности.

Цель работы. Повышение эффективности функционирования грунтовых аккумуляторов гелиосистемы за счет рационального непрерывного круглосуточного режима закачки теплоты в грунт.

Методы исследования. Разработка математической модели повышенной информативности на основе трехмерного уравнения теплопроводности в грунте, а также уравнений, описывающих энергетические процессы в сопряженных элементах гелиосистемы в реальных условиях прихода солнечной энергии и потребления тепла в развертке годового цикла.

Для исследования был выбран грунтовой теплообменник коаксиального типа (труба в трубе). Куст аккумулятора состоит из 9 вертикальных параллельно включенных теплообменников.

Учитывались процессы поглощения лучистой энергии в солнечном коллекторе (СК) и переноса тепла в теплообменнике и грунте. Теплообмен в грунтовом теплообменнике описан системой

дифференциальных уравнений энергетического баланса [24]: для теплоносителя внутренней трубы (подающей); для стенки внутренней трубы; для теплоносителя внешней трубы (обратной); для наружной стенки. Теплообмен в грунте описан уравнением нестационарной теплопроводности в прямоугольных координатах в трехмерной постановке. Система уравнений решалась конечно-разностным методом. Материал труб теплообменника – пластик. Диаметр внешних труб теплообменника в соответствии с [24] принимался равным 180 мм. Теплоноситель – вода. Сопряжение грунтового теплообменника с гелиоколлекторами осуществлялось введением в расчетную математическую модель системы уравнений, описывающих условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе [27]. Отбор тепла от аккумулятора осуществлялся посредством теплового насоса (ТН), работа которого в нестационарных условиях описывалась уравнениями, отвечающими термодинамическому циклу преобразования энергии в испарителе и конденсаторе при переменных условиях формирования зон испарения и конденсации.

Анализ работы ТН в нестационарных условиях позволил выявить зависимость между энергозатратами и температурой теплоносителя на входе в испаритель t_0 при заданной расчетной (конструктивной) теплопроизводительности ТН по испарителю Q_0^p , которая имеет вид, кВт:

$$N = 0,0103 + 0,2177 \cdot \Phi_0^p + \frac{\Phi_0^p \cdot \vartheta_0}{113,907 + 3,517\Phi_0^p},$$

где $\vartheta_0 = t_0 / t'_0$; t'_0 – базовая температура теплоносителя, $t'_0 = 10^\circ\text{C}$; $\Phi_0^p = Q_0^p / Q'_0$; Q'_0 – базовая теплопроизводительность ТН, $Q'_0 = 1$ кВт.

Область определения зависимости:

$$Q_0^p = (2 \dots 10) \text{ кВт}, t_0 = (10 \dots 45) ^\circ\text{C}.$$

Условия работы СК определялись периодом, который начинался 15 апреля (окончание отопительного сезона) и заканчивался через 6 месяцев. Для исследования приняты современные плоские СК.

В результате решения системы уравнений принятой математической модели определялись температурные поля в теплообменнике и грунтовом массиве, теплосодержание массива грунта, температура и скорость циркулирующего в гелиосистеме теплоносителя в период сезонной работы гелиосистемы.

Итерационным расчетом процесса закачки тепла определялась общая площадь СК, производительность которых отвечала условию удовлетворения тепловой нагрузки потребителя в реальной развертке теплового графика.

Закачка тепла производилась в две фазы, одна из

которой – дневная (активная), когда работают СК, вторая – ночная (пассивная), когда остаточный тепловой потенциал теплоносителя передается грунту в режиме интенсивного теплообмена при вынужденном движении в контуре: опускная – подъемная трубы.

Активная фаза во всех рассмотренных случаях протекает при непрерывном изменении скорости теплоносителя, обусловленном необходимостью поддержания постоянной температуры теплоносителя на входе в теплообменники зондов при переменной производительности СК.

В пассивной фазе скорость теплоносителя остается постоянной. Полученные данные показывают, что воздействие на условия проведения пассивной фазы путем увеличения скорости теплоносителя приводит к росту количества накопленного в грунте тепла. Например, при высоте зондов 10 м и теплофизических свойствах грунта, соответствующих морфологии глины с коэффициентом температуропроводности $a = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, это изменение в конце стадии закачки составляет около 25 %. При этом заметно, что темп роста рассматриваемой функции снижается с увеличением скорости теплоносителя.

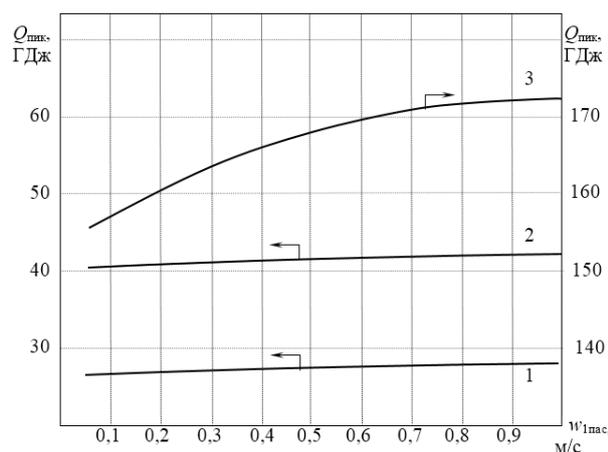


Рис. 1. Зависимость максимального количества накопленного в грунте тепла за сезон закачки от скорости теплоносителя на входе в теплообменник в пассивной стадии, длины зонда и теплофизических свойств грунта: 1 – $h_{\text{то}}=10 \text{ м}$, $a=2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $h_{\text{то}}=10 \text{ м}$, $a=5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $h_{\text{то}}=50 \text{ м}$, $a=5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 1 представлены данные по влиянию скорости теплоносителя в пассивной стадии на максимальное количество тепла (пиковое – $Q_{\text{пик}}$), накопленного в грунте за сезон закачки. Для зондов небольших размеров (высота $h_{\text{то}} = 10 \text{ м}$) влияние скорости на $Q_{\text{пик}}$ невелико. Это обстоятельство имеет место для разных грунтов. С увеличением высоты зонда влияние скорости теплоносителя возрастает (кривая 3), и для зонда с $h_{\text{то}} = 49 \text{ м}$, например, в рассматриваемых пределах изменения скорости достигает 10 %.

Темп изменения данной целевой функции для разных скоростей w_{1nac} отличен. С ростом w_{1nac} изменение $Q_{\text{пик}}$ уменьшается, асимптотически приближаясь к предельному значению. Можно выделить рубежные значения скорости $w_{1nac} = (0,7 \dots 1,0) \text{ м/с}$, когда изменение $Q_{\text{пик}}$ становится несущественным.

Для технико-экономического обоснования важными показателями являются размеры активной площади СК, необходимой для осуществления рациональной работы системы приемник солнечной энергии – теплообменник грунтового аккумулятора. Показательным для оценки выбора площади СК является отношение суммарной площади солнечных коллекторов к пиковому количеству тепла, накопленного в грунте – $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$. Назовем этот показатель удельной площадью СК, необходимой для зарядки грунтового аккумулятора.

На рис. 2 представлены данные по влиянию скорости теплоносителя в пассивной стадии на показатель $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$. С увеличением скорости удельная площадь $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$ уменьшается.

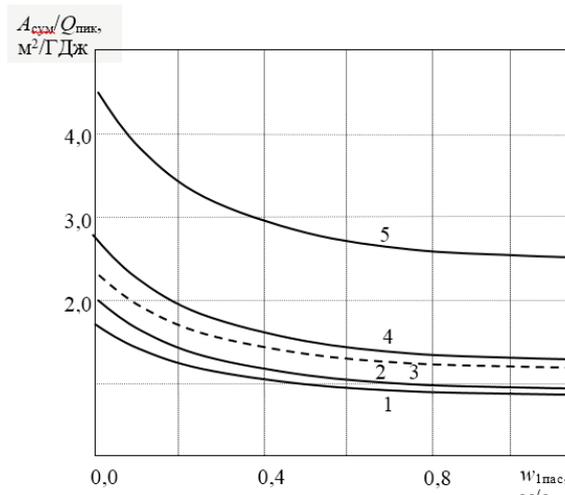


Рис. 2. Зависимость относительной (удельной) площади солнечных коллекторов от скорости теплоносителя на входе в теплообменник в пассивной стадии и шага между зондами, м: 1 – 6; 2 – 4; 3 – 4; 4 – 3; 5 – 2. Кривая 3 – длина зонда 49 м, остальные кривые – длина зонда 10 м.

При этом можно выделить область скоростей, где их влияние невелико. Она соответствует величинам $w_{1nac} = (0,7 \dots 0,8) \text{ м/с}$, что согласуется с результатами анализа, проведенного выше. Такая зависимость характерна для зондов различной длины и при разном шаге в кусте.

Анализ данных на рис. 2 показывает, что показатель $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$ зависит также от шага расположения зондов в кусте. Наименьшей удельной площадью обладает гелиоаккумулирующая система при большом шаге ($S = 6 \text{ м}$), с уменьшением шага $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$ возрастает. Увеличение шага приводит к

росту теплосодержания массива $Q_{\text{пик}}$. В конце полугодического периода закачки тепла пиковое количество тепла возрастает в 2...3 раза при увеличении шага от 2 м до 6 м в рассматриваемых условиях. Это явление объясняется интенсификацией теплообмена за счет увеличения температурного напора между теплоносителем зонда и грунтом, так как рост шага приводит к снижению температуры массива грунта в межзондовом пространстве. Однако зависимость пикового количества тепла от расстояния между зондами нелинейна.

С увеличением шага рост $Q_{\text{пик}}$ уменьшается, асимптотически приближаясь к некоторому уровню.

Рубежными для данных условий можно считать значения $S = (5...6)$ м, превышение которых мало отражается на величине функции $Q_{\text{пик}}$. Однако увеличение шага приводит к изменению уровня температур в грунте. Принимая t_c качестве индикаторной температуры на среднем расстоянии между зондами и на глубине равной полувысоте зонда, получим (грунт – глина), что на 180 сутки зарядки для куста с шагом 2,0 м t_c составляет 47°C, для 4,0 м – 37,3 °C, а для 6,0 м – 25,9 °C. Уровень температуры грунта определяет качество энергии в аккумуляторе, дальнейшая трансформация которой в ТН отражается на его эффективности.

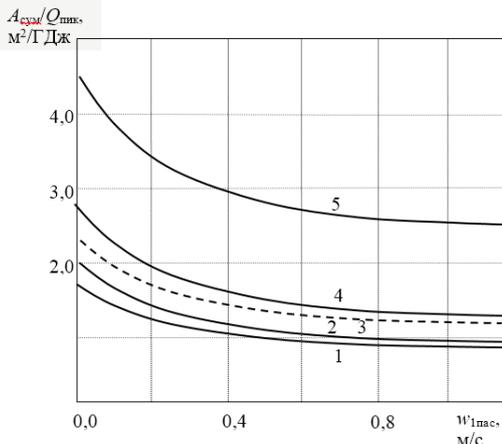


Рис. 3. Изменение сезонных энергозатрат на привод ТН в зависимости от температуры теплоносителя на входе в зонды t_{in} , мощности ТН и шага зондов; обозначения – шаг, м/мощность, кВт; грунт – известняк: 1 – 6/(10...20); 2 – 4/(10...20); 3 – 4/5; глина: 4 – (4...6)/(5...20)..

На рис. 3 приведены данные по общесезонным энергозатратам на привод ТН в зависимости от ряда факторов, в том числе и шага зондов. Увеличение шага приводит к росту затрат энергии, что объясняется снижением температуры грунта и связанное с этим увеличение температурного подъема в ТН. Примечательно, что энергозатраты формируются при зимнем отборе тепла из аккумулятора, качество теплоты в котором (температурный потенциал) зависит от условий летней закачки. Как следует из рис. 3, зимние энергозатраты на ТН возрастают с увеличением

температуры теплоносителя на входе в зонды в летний период. Такая закономерность наблюдается в различных условиях, как при изменении свойств грунта, так и шага зондов.

Важно отметить, что в этой закономерности влияние факторов также опосредованное. Температура относится к летним факторам условий закачки аккумулятора, а работа ТН осуществляется в зимний период, при разрядке аккумулятора.

Для обобщенного анализа такой закономерности используем показатель $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$. Влияние на нее температуры теплоносителя показано на рис. 4. Как видно, с увеличением температуры теплоносителя относительная площадь солнечных коллекторов растет, что вполне согласуется с общими представлениями. Такая зависимость наблюдается в разных грунтах. Таким образом, полученные данные показывают целесообразность снижения температуры теплоносителя. Из рис. 4 также следует, что увеличение шага зондов уменьшает площадь СК.

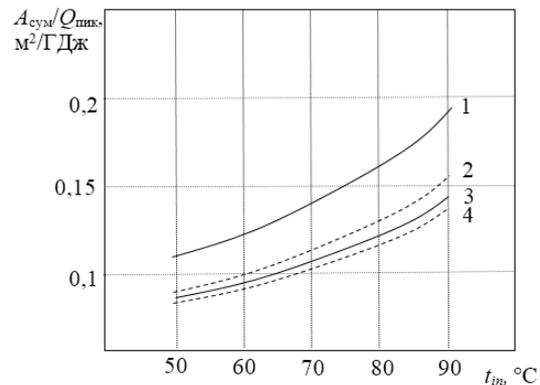


Рис. 4. Зависимость относительной (удельной) площади солнечных коллекторов от температуры теплоносителя на входе в теплообменник при зарядке аккумулятора, типа грунта и шага между зондами, м: 1 – 4; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 6. Кривые 1 и 3 – известняк, 2 и 4 – глина.

На рис. 5 показана зависимость расчетной отопительной нагрузки, которая может быть удовлетворена в полной мере за счет накопленного в аккумуляторе тепла, от температуры теплоносителя.

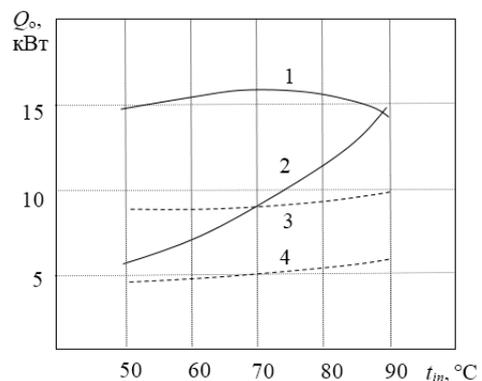


Рис. 5. Зависимость расчетной отопительной нагрузки потребителя от температуры теплоносителя на входе в теплообменник.

Видно, что увеличение температуры теплоносителя приводит к росту отопительной нагрузки (рис. 5: глубины зонда и шага между зондами, м: 1 – 6; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 4; кривые 1 и 2 – глубина зонда 49 м, 3 и 4 – 24 м; грунт – известняк). Рассматривая эту зависимость совместно с рис. 4, видим, что этот рост обусловлен увеличением поверхности СК. Вместе с тем, как следует из рис. 5, увеличение тепловой производительности системы проявляется при умеренных величинах шага зондов. При шаге зонда 6 м влияние температуры теплоносителя уже не проявляется. Подобное влияние наблюдается и в зависимости по влиянию температуры теплоносителя на энергозатраты в ТН.

Таким образом, можно выделить области рациональных размеров шага размещения зондов и величины температуры теплоносителя.

Обсуждение результатов эксперимента. Обобщение полученных данных позволяет выработать рекомендации по ведению режима работы гелиоаккумулирующей системы теплоснабжения. Рациональные условия работы системы включают: в дневное время – переменный закон изменения скорости теплоносителя в грунтовых теплообменниках в соответствии с тепловой производительностью СК при ограничении по максимальному значению (2 м/с); в ночное время – рециркуляция теплоносителя в контуре теплообменника из подающей и обратной труб с постоянной скоростью на входе, равной $w_{1nac} = 0,7...0,8$ м/с.

Из полученных данных следует, что шаг между зондами оказывает существенное влияние на удельные показатели гелиосистемы. С ростом шага показатель $A_{сум} / Q_{пик}$ уменьшается, однако при этом снижается температурный потенциал грунтового массива. С учетом этих обстоятельств возможен рациональный выбор шага кустового аккумулятора.

Как показал анализ полученных данных, широта местности и глубина зондов относятся к факторам, влиянием которых можно пренебречь для этой функции, так как зафиксированные отклонения от обобщающей линии носят случайный характер и не позволяют выявить статистически рациональную связь. Закономерно устойчивым фактором влияния является температуропроводность грунта.

Поэтому окончательно принята однофакторная зависимость. Рост температуропроводности грунта приводит к увеличению оптимального шага. Это связано с зависимостью аккумулирующей способности массива грунта от его теплофизических свойств. Обобщающее расчетное соотношение для различных регионов найдено в виде

$$S^{opt} = 1 / \left[0,25 - 5,69 \cdot 10^{-6} \exp(a_{гр} \cdot 10^7) \right].$$

Область определяющих параметров
 $h = 10...49$ м, $a_{гр} = (2,78...9,61) 10^{-7}$ м²/с.

С учетом рассмотренных факторов можно выбрать рациональное значение температуры теплоносителя на входе в теплообменник равным 50 °С.

Выводы и перспективы дальнейшего развития данного направления.

1. При кустовом способе организации сезонного аккумулятора рециркуляция теплоносителя в теплообменниках в период отсутствия солнечной радиации (в пассивной фазе) способствует повышению эффективности закачки тепла в грунт.

2. Граничная скорость теплоносителя на входе в теплообменник в пассивной фазе составляет $w_{1nac} = 0,7...0,8$ м/с. Поддержание граничных скоростей позволяет достичь повышения энтальпии грунта и уменьшить относительную площадь солнечных коллекторов $A_{сум} / Q_{пик}$. Уменьшению этого показателя также способствует рациональная величина температуры теплоносителя на входе в грунтовые теплообменники, которую можно рекомендовать на уровне 50 °С.

3. Рациональные значения шага куста зондов в основном являются функцией теплофизических свойств грунта и могут быть определены по полученной зависимости.

Список литературы

1. Салько А. Энергосбережение и энергоэффективность в Украине. Достижения и планы // Электрик. 2018. № 11–12. С. 26–28.
2. Білодід В.Д. Прогнозна структура теплоснабження України на період до 2040 року // Проблеми загальної енергетики. 2016. № 1 (44). С. 24–33.
3. Балусева О.В., Кумачова О.С. Особливості комплексної державної політики розвитку "зеленої" економіки в Україні в умовах системних змін // Інвестиції: практика та досвід. 2016. № 24. С. 130–135.
4. Шилов А. Развитие "зеленых" технологий в европейской и мировой энергетике // Электрик. 2016. № 12. С. 20–23.
5. Пришляк Н.В. Відновлювальна енергетика в Індії: сучасний стан та перспективи розвитку // Інвестиції: практика та досвід. 2018. № 21. С. 15–20.
6. Нікульшин В.Р., Височин В.В. Нетрадиційні джерела енергії: навч. посібник. Одеса: КПЦ Білка, 2016. 208 с.
7. Мусяненко Д. Солнечная энергетика – "наступает" // Бизнес и безопасность. 2018. № 1. С. 97–98.
8. Алехина С. Солнечная энергетика в Украине: итоги и перспективы // Радиоаматор. 2017. № 1. С. 38–39.
9. Єлісеєва О.К., Хазан П.В. Економіко-статистичний аналіз сонячної енергетики регіонів України // Статистика України. 2016. № 4. С. 51–58.
10. Рощина Н.В., Борданова Л.С. Аналіз процесу впровадження систем виробництва сонячної енергії для приватних домогосподарств в Україні // Інвестиції: практика та досвід. 2018. № 19. С. 24–27.
11. Бухкало С.И., Селихов Ю.А., Воробьев В.М. Вопросы энерго- и ресурсосбережения при использовании полимерных материалов в гелиосистемах // Интегр. технології та енергозбереження. 2002. № 2. С. 17–20.

12. Бухкало С.И., Селихов Ю.А., Воробьев В.М., Костин В.М. Автономная система горячего водоснабжения с полимерными гелиоколлекторами // *Интегр. технології та енергозбереження*. 2003. № 1. С. 21–25.
13. Бухкало С.И., Селихов Ю.А., Воробьев В.М. Вопросы энерго- и ресурсосбережения при использовании полимерных материалов в гелиосистемах // *Интегр. технології та енергозбереження*. 2003. № 2. С. 9–12.
14. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухкало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экологические и ресурсосбережение. – Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004. – с. 70–75.
15. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Зипунников М.М. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи): Підручник. – К.: ЦНЛ, 2013. – 352 с.
16. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Денисова А.Е., Демидов І.М. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи): Підручник. 2-ге видання, перероблене. – К.: ЦНЛ, 2016. – 470 с.
17. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Бухкало С.И. Полімерна композиція, Патент України, № 72078 А, Бюл. № 10, 2004.
18. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Селихова Н.В., Бухкало С.И. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
19. Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Горбунова О.В. Оценочный расчет возможности использования системы солнечных коллекторов как альтернативного источника энергии // *Интегр. технології та енергозбереження*. 2016. № 5. С. 134–138.
20. Климчук О.А. Інтегровані системи переривчастого теплопостачання для адміністративних установ та навчальних закладів (теоретичні основи, аналіз, оптимізація): дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.06. Одеса, 2018. 370 с.
21. Куц Г.О., Станиціна В.В., Коберник В.С. Порівняльна оцінка вартості теплової енергії від діючих та прогнозованих теплогенеруючих джерел для систем теплопостачання країни // *Проблеми загальної енергетики*. 2016. № 3(46). С. 12–18.
22. Селихов Ю. А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А. Энергетический метод расчета оптимизации работы одноконтурной солнечной установки для горячего водоснабжения // *Интегр. технології та енергозбереження*. 2017. № 1. С. 9–13.
23. Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Горбунова О.В. Оптимизация работы солнечной установки для горячего водоснабжения и отопления зданий // *Интегр. технології та енергозбереження*. 2016. № 5. С. 15–20.
24. Высочин В.В., Громовой А.Ю. Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы гелиосистемы // *Праці Одеського політехн. ун-ту*. Одеса, 2013. Вип. 2(41). С. 148–152.
25. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников // *Промышленная теплотехника*. 2005. Т.27, № 6. С. 27–31.
26. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беяева Т.Г. Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения // *Промышленная теплотехника*. 2003. Т.25, № 6. С. 42–50.
27. Высочин В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла // *Праці Одеського політехн. ун-ту*. Одеса, 2011. Вип.2 (36). С. 125–129.

References (transliterated)

1. Sal'ko A. Jenergosberezhenie i jenergojeffektivnost' v Ukraine. Dostizhenija i plany [Energy saving and energy efficiency in Ukraine. Achievements and Plans] // *Jelektrik [An electrician]*. 2018. No. 11–12, pp. 26–28.
2. Bilodid V.D. Prognozna struktura teplozabezpechennja Ukrai'ny na period do 2040 roku [Forecast structure of heat supply of Ukraine for the period up to 2040] // *Problemy zagal'noi' energetyki [Problems of general energy]*. 2016. No. 1 (44), pp. 24–33.
3. Balujeva O.V., Kumachova O.S. Osoblyvosti kompleksnoi' derzhavnoi' polityky rozvytku "zelenoi'" ekonomiky v Ukrai'ni v umovah systemnyh zmin [Features of a comprehensive state policy on the development of a "green" economy in Ukraine under conditions of systemic changes] // *Investyicii': praktyka ta dosvid [Investments: practice and experience]*. 2016. No. 24. pp. 130–135.
4. Shilov A. Razvitie "zelenyh" tehnologij v evropejskoj i mirovoj jenergetiki [The development of "green" technologies in the European and world energy] // *Jelektrik [An electrician]*. 2016. No. 12. pp. 20–23.
5. Pryshljak N.V. Vidnovljuval'na energetyka v Indii': suchasnyj stan ta perspektyvy rozvytku [Renewable Energy in India: Current State and Development Prospects] // *Investyicii': praktyka ta dosvid [Investments: practice and experience]*. 2018. No. 21. pp. 15–20.
6. Nikul'shyn V.R., Vysochyn V.V. Netradycijni dzhерелa energii': navch. Posibnyk [Unconventional energy sources: teach. manual]. Odesa: KPC Bilka, 2016. 208 p.
7. Musienko D. Solnechnaja jenergetika – "nastupaet"[Solar energy - "comes"] // *Biznes i bezopasnost' [Business and Security]*. 2018. No. 1. pp. 97–98.
8. Alehina S. Solnechnaja jenergetika v Ukraine: itogi i perspektivy [Solar energy in Ukraine: results and prospects] // *Radioamator [Radioamator]*. 2017. No. 1. pp. 38–39.
9. Jelisjejeva O.K., Hazan P.V. Ekonomiko–statystychnyj analiz sonjachnoi' energetyki regioniv Ukrai'ny [Economic-statistical analysis of solar energy in the regions of Ukraine] // *Statystyka Ukrai'ny [Statistics of Ukraine]*. 2016. No. 4. pp. 51–58.
10. Roshhyna N.V., Bordanova L.S. Analiz procesu vprovadzennja system vyrobnyctva sonjachnoi' energii' dlja pryvatnyh domogospodarstv v Ukrai'ni [Analysis of the implementation process of solar energy production systems for private households in Ukraine] // *Investyicii': praktyka ta dosvid [Investments: practice and experience]*. 2018. no. 19. pp. 24–27.
11. Bukhhalo S.I., Selihov Ju.A., Vorob'ev V.M. Voprosy jenergo- i resursosberezhenija pri ispol'zovanii polimernyh materialov v geliosistemah // *Integr. tehnologii ta energozberezhenija*. 2002. № 2, pp. 17–20.
12. Bukhhalo S.I., Selihov Ju.A., Vorob'ev V.M., Kostin V.M. Avtonomnaja sistema gorjachego vodosnabzhenija s polimernymi geliokollektorami // *Integr. tehnologii ta energozberezhenija*. 2003. No 1, pp. 21–25.
13. Bukhhalo S.I., Selihov Ju.A., Vorob'ev V.M. Voprosy jenergo- i resursosberezhenija pri ispol'zovanii polimernyh materialov v geliosistemah // *Integr. tehnologii ta energozberezhenija*. 2003. No 2, pp. 9–12.
14. Selihov Ju.A., Ved' V.E., Bukhhalo S.I., Kostin V.M. Konstrukcionnye osobennosti uvelichenija jeffektivnosti raboty gelioustanovok. Jekotehnologii i resursosberezhenie. – Kiev: Tipografija NAN Ukrainy, No 3, 2004. – pp. 70–75.

15. Tovazhnjanskij L.L., Bukhhalo S.I., Zipunnikov M.M. ta in. Zagal'na tehnologija harchovoї promislovosti u prikladah i zadachah (innovacijni zahodi): Pidruchnik. – K.: CNL, 2013. – 352 p.
16. Tovazhnjanskij L.L., Bukhhalo S.I., Denisova A.C., Demidov I.M. ta in. Zagal'na tehnologija harchovoї promislovosti u prikladah i zadachah (innovacijni zahodi): Pidruchnik. 2-ge vidannja, pereroblene. – K.: CNL, 2016. – 470 p.
17. Selihov Ju.A., Selihova L.Ju., Bukhhalo S.I. Polimerna kompozicija, Patent Ukraini, № 72078 A, Bjul. № 10, 2004.
18. Selihov Ju.A., Selihova L.Ju., Selihova N.V., Bukhhalo S.I. Dvokonturna geliovodonagrivna ustanovka, Patent Ukraini, № 64198 A, Bjul. № 2, 2004.
19. Selihov Ju.A., Kocarenko V.A., Gorbunov K.A., Gorbunova O.V. Ocenocnyj raschet vozmozhnosti ispol'zovanija sistemy solnechnyh kollektorov kak al'ternativ-nogo istochnika jenerгии // Integr. tehnologii' ta energoberezhennja. 2016. № 5, pp. 134–138.
20. Klymchuk O.A. Integrovani systemy pereryvchastogo teplopostachannja dlja administratyvnyh ustanov ta navchal'nyh zakladiv (teoretychni osnovy, analiz, optymizacija): dys. ... d-ra tehn. nauk: 05.14.06. [Integrated systems of intermittent heat supply for administrative institutions and educational institutions (theoretical bases, analysis, optimization): diss. ... Dr. tech. sciences: 05.14.06. Odessa] Одеса, 2018. 370 p.
21. Kuc G.O., Stanycina V.V., Kobernyk V.S. Porivnjal'na ocinka vartosti teplovoi' energii' vid dijuchyh ta prognozovanyh teplogenerujuchyh dzherel dlja system teplopostachannja kraj'ny [Comparative assessment of the cost of heat energy from current and projected heat sources for the country's heat supply systems] // Problemy zagal'noi' energetyky [Problems of general energy]. 2016. no. 3(46). pp. 12–18.
22. Selihov Ju.A., Kocarenko V.A., Gorbunov K.A. Jenergeticheskij metod rascheta optimizacii raboty odnokonturnoj solnečnoj ustanovki dlja gorjachego vodosnabzhenija [Energy method for calculating the optimization of a single-circuit solar system for hot water supply] // Integr. tehnologii' ta energoberezhennja [Integr. technology and energy saving]. 2017. No. 1. pp. 9–13.
23. Selihov Ju.A., Kocarenko V.A., Gorbunov K.A., Gorbunova O.V. Optimizacija raboty solnečnoj ustanovki dlja gorjachego vodosnabzhenija i otoplenija zdanij [Optimization of the solar system for hot water and heating buildings] // Integr. tehnologii' ta energoberezhennja [Integr. technology and energy saving]. 2016. no. 5. pp. 15–20.
24. Vysochin V.V., Gromovoj A.Ju. Rol' gruntovogo teploobmennika v sglazhivanii neravnomernosti raboty geliosistemy [The role of the ground heat exchanger in smoothing the unevenness of the solar system] / Praci Odes'kogo politehn.un [Proceedings of Odessa Polytechnic University] Odesa, 2013. Vol. 2(41), pp. 148–152.
25. Nakorchevskij A.I., Basok B.I. Optimal'naja konstrukcija gruntovyh teploobmennikov [Optimum design of ground heat exchangers] // Promyshlennaja teplotehnika [Industrial heat engineering]. 2005. T.27, no. 6. pp. 27–31.
26. Nakorchevskij A.I., Basok B.I., Beljaeva T.G. Problemy gruntovogo akumulirovanija teploty i metody ih reshenija [Problems of ground heat storage and methods for their solution] // Promyshlennaja teplotehnika [Industrial heat engineering]. 2003. T.25, no. 6. pp. 42–50.
27. Vysochin V.V. Matematicheskaja model' geliosistemy s sezonnym akumuljatorom tepla [Mathematical model of a solar system with a seasonal heat accumulator] // Praci Odes'kogo politehn.un-tu [Proceedings of Odessa Polytechnic University]. Odesa, 2011. Vol.2 (36). pp. 125–129.

Поступила (received) 15.07.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Височин Віктор Васильович (Височин Виктор Васильевич, Wysochin Viktor Vasyl'ovuch) – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна;

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2279-203X>; e-mail: vwwin.od@gmail.com

Нікульшин Володимир Русланович (Никольшин Владимир Русланович, Nikulshin Volodymyr Ruslanovych) – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5946-8562>; e-mail: vnikul@paco.net

Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiiivna) – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, директор Українсько-польського інституту; м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; e-mail: alladenysova@gmail.com.

Білоусова Надія Георгїївна (Белоусова Надежда Георгиевна, Bilousova Nadiia Georgiivna) – Одеський національний політехнічний університет, завідувач лабораторією кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4386-7101>; e-mail: wywka3@i.ua