

## **УСЛОВИЯ СОПРЯЖЕНИЯ ГЕЛИОСИСТЕМ С СЕЗОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛА ПО РЕГИОНАЛЬНОМУ ФАКТОРУ**

*Досліджено нестационарні процеси теплообміну в геліосистемі з тепловим насосом і сезонним акумулятором тепла, що складається з дев'яти ґрунтових вертикальних теплообмінників, в процесі періодичної, з добовими циклами, зарядки акумулятора в літній період і розрядки в зимовий для різних регіонів України. Метод дослідження - чисельний. Математична модель включає рівняння, що описують умови приходу й перетворення сонячної енергії в геліоколекторах, теплообмін у ґрунтових теплообмінниках у тривимірному масиві ґрунту й перемінні процеси в тепловому насосі. Ітераційним методом підбиралися умови повного автономного теплопостачання споживача по опалювальному навантаженню. Показано можливість підвищення ефективності акумулятора шляхом вибору раціонального кроку куща й довжини зондів для широт 45-51 градусів. Запропоновані рекомендації з визначення кроку зондів у кущі і їхньої довжини за умови повного забезпечення споживача тепла протягом усього зимового періоду.*

**Ключові слова:** сезонний акумулятор, геліосистема, тепловий насос.

*Исследованы нестационарные процессы теплообмена в гелиосистеме с тепловым насосом и сезонным аккумулятором тепла с девятью 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. Математическая модель включает уравнения, описывающие условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторах, теплообмен в грунтовых теплообменниках в трехмерном массиве грунта и переменные процессы в тепловом насосе. Итерационным методом подбирались условия полного автономного теплоснабжения потребителя по отопительной нагрузке. Показана возможность повышения эффективности аккумулятора путем выбора рационального шага куста и длины зондов для широт 45-51 градусов. Предложены рекомендации по определению шага зондов в кусте и их длины при условии полного обеспечения потребителя тепла в течение всего зимнего периода.*

**Ключевые слова:** сезонный аккумулятор, гелиосистема, тепловой насос.

*Non-stationary processes of heat exchange in a solar plant system with the thermal pump and the seasonal accumulator of heat with 9 soil vertical heat exchangers in the course of periodic, with daily cycles, charges of a accumulator during the summer period and discharges in winter for various regions of Ukraine are investigated. A research method - numerical. The mathematical model includes the equations describing conditions of arrival and*

*transformation of solar energy in a solar plant system, heat exchange in soil heat exchangers in a three-dimensional file of a ground and variable processes in the thermal pump. An iterative method conditions of a full independent heat supply of the consumer on heating loading stole up. Possibility of increase of efficiency of the accumulator by a choice of a rational step of a bush and length of probes for latitude of 45-51 degrees is shown. Recommendations about definition of a step of probes in a bush and under condition of full maintenance of the consumer of heat during all winter period are offered their lengths.*

**Keywords:** *the seasonal accumulator, solar plant system, the thermal pump.*

В структуру гелиосистем отопления входят сезонные аккумуляторы тепла и тепловые насосы (ТН). Среди сезонных аккумуляторов тепла выделяются вертикальные многозондные (кустовые) конструкции [1,2], обладающие хорошей архитектурой и эксплуатационными показателями. Кустовые структуры аккумуляторов различаются пространственным размещением, количеством зондов и их размерами. Перечисленные структурные факторы определяются условиями работы аккумулятора в грунте, а также сопряженной гелиосистемы. Разнообразие условий работы гелиосистем требует надежных обоснований, учитывающих многофакторность эксплуатации. Для проектировщиков важным является наличие методических рекомендаций по выбору конструктивных и эксплуатационных параметров сопряженных элементов системы.

Обычно структуру грунтового аккумулятора предлагается выполнять в виде прямоугольного в плане куста с равным шагом между зондами [2, 3, 4]. Такие кусты различаются количеством зондов, их длиной и шагом. Данные [2,4] показывают, что шаг расположения зондов в кусте оказывает существенное влияние на количество накопленного в грунте тепла. Увеличение шага приводит к росту теплосодержания массива. Однако увеличение шага приводит к уменьшению уровня температур в грунте. В [4] приведены результаты исследования по оптимизации шага и длины зондов на основе многофакторной математической модели. Однако представленные данные получены при конкретных условиях и не могут быть распространены на различные регионы.

**Цель.** Определение рациональных параметров структуры кустового грунтового аккумулятора гелиосистемы – шага зондов и длины, работающего в круглогодичном цикле в различных регионах, а также нагрузочных характеристик системы на основе математической модели с многофакторной целевой функцией.

Архитектура модельного объекта включала гелиосистему с плоскими солнечными коллекторами (СК), тепловой насос и грунтовый аккумулятор, состоящий из 9 вертикальных параллельно включенных теплообменников коаксиального типа высотой  $h$  и поперечным шагом расположения  $S$ . Задача решалась в сопряженном виде с рассмотрением процессов поглощения лучистой энергии в СК, переноса тепла в теплообменнике и грунте, а также преобразования энергии в ТН. Теплообмен в грунтовом теплообменнике описан системой дифференциальных уравнений энергетического баланса [1]: 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. Граничные условия

сформулированы таким образом, чтобы охватить процесс переноса и накопления тепла в грунте как в зоне теплообменников, так и в сопряженных периферийных областях, включая область ниже теплообменников. Система уравнений решалась конечно—разностным методом. Материал труб теплообменника — пластик, теплопроводность стенки  $\lambda_{\text{н}} = 0,28 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Диаметр внешних труб теплообменника в соответствии с [1] принимался равным 180 мм. Теплоноситель — вода, в этой связи охлаждение теплоносителя в испарителе ТН ограничивалось температурой 0°C. При анализе моделировалась работа ТН при различных температурах теплоносителя, циркулирующего между зондами и испарителем ТН, а также при изменении тепловой нагрузки.

Условия работы гелиосистемы конкретизировались координатами различных регионов Украины с широтой от 45 до 51 градуса в период, который начинался 15 апреля (окончание отопительного сезона) и заканчивался через 6 месяцев (180 суток). Для исследования приняты современные плоские гелиоколлекторы с приведенной характеристикой:

$$\frac{U}{(\tau\alpha)} = 4,4 \text{ Вт/(м}^2\text{К)},$$

где  $U$  — коэффициент потерь теплоты;  $(\tau\alpha)$  — оптическая характеристика гелиоколлектора.

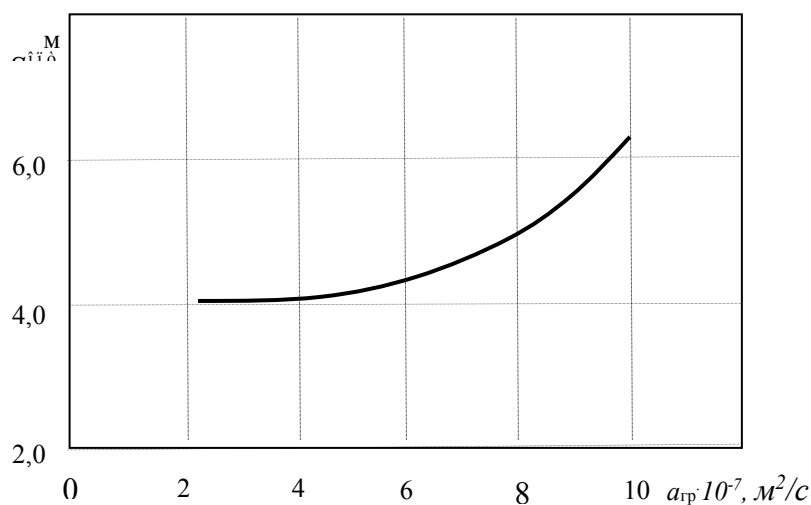
При решении системы уравнений математической модели определялись температурные поля в теплообменнике и грунтовом массиве, теплосодержание массива грунта, температура и скорость циркулирующего в гелиосистеме теплоносителя в развертке суточной и сезонной работы гелиосистемы. Итерационным расчетом процесса закачки тепла определялась общая площадь СК, тепловая производительность которых лимитировалась максимальной скоростью теплоносителя (2 м/с) в грунтовых теплообменниках при фиксированной температуре теплоносителя на входе в теплообменник. Также итерационным расчетом определялись расчетная тепловая нагрузка отопления ( $Q_o$ ) и соответствующая расчетная (номинальная) тепловая нагрузка испарителя ТН ( $Q_{\text{и}}$ ). Отопительная нагрузка  $Q_o$  определялась по условию удовлетворения ежедневного графика тепловой нагрузки потребителя в течение всего периода отопления в различных регионах. Алгоритм модели позволял отпускать теплоту потребителю в режиме пропусков в зависимости от температуры теплоносителя на выходе из грунтового теплообменника. Нижними критериями определения  $Q_o$  являлись либо суточный недостаток теплоты (недотоп) в течении каких-либо суток отопительного периода, либо достижение минимальной температуры грунта (фоновой) на среднем расстоянии между зондами и на глубине равной полувысоте зонда (переохлаждение грунта).

Исследования для выявления функциональной зависимости шага зондов в кусте были проведены при изменении глубины зондов, широты местности и теплофизических свойств грунта. Шаг зондов выбирался исходя из наибольшего значения достижимой расчетной отопительной нагрузки. Как показал анализ 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 теплопроводность грунта. Поэтому окончательно принята однофакторная зависимость, обобщение которой представлено на рис. 1. Видно, что рост теплопроводности грунта приводит к увеличению оптимального шага. Это связано с зависимостью аккумулирующей способности массива грунта от его теплофизических свойств. Рост оптимального шага означает улучшение условий наполнения грунта теплотой. Обобщающее расчетное соотношение для различных регионов найдено в виде

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

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



**Рис.1. Зависимость оптимального шага зондов от теплопроводности грунта  $a_{\text{гр}}$**

На рис. 2 представлена зависимость оптимальной глубины зонда от расчетной отопительной нагрузки потребителя при разной широте местности. Отопительная нагрузка определялась на весь куст, состоящий из девяти зондов. Видно, что при одной и той же отопительной нагрузке глубина зонда зависит от широты. Увеличение широты уменьшает необходимую глубину зонда. Анализ этого явления показывает, что наибольшее влияние на эффективность работы солнечной системы в годовом цикле оказывает процесс разрядки аккумулятора. При зарядке влияние широты проявляется мало. Особенности процесса разрядки аккумулятора приводят к тому, что остаточное, после полного завершения отбора, количество теплоты в грунте снижается с ростом широты. Эти особенности обусловлены сочетанием ряда факторов: соотношением периодов работы и паузы теплового насоса в условиях удовлетворения суточной тепловой нагрузки, скоростью переформирования температурного поля в грунте, температурой наружного воздуха и т.д. Основной же особенностью является то, что блокировка развития процесса разрядки по сценарию полного ежесуточного обеспечения тепловой нагрузки за счет аккумулятора происходит, как правило, позже пикового периода теплоснабжения, при этом наибольшее количество тепла отбирается ранее, что и отражается на общем показателе.

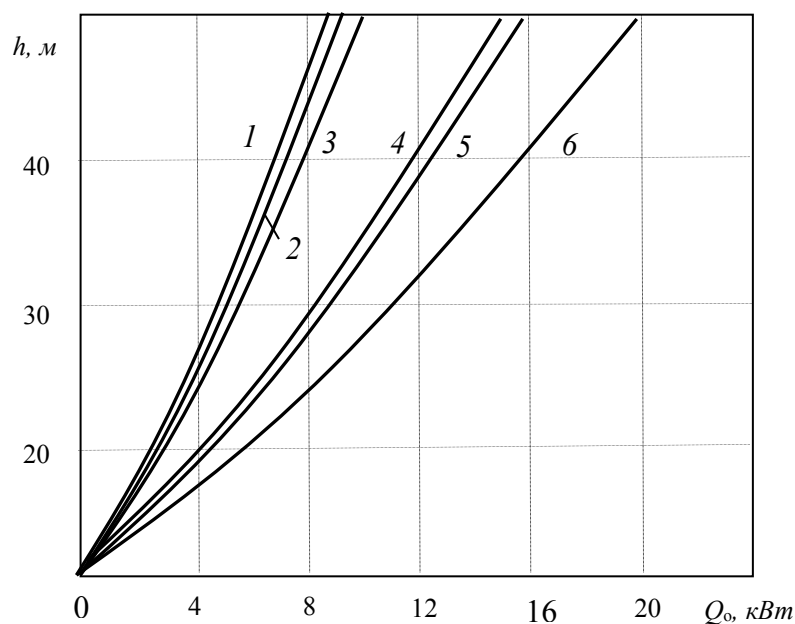


Рис. 2. Зависимость оптимальной глубины зонда от расчетной отопительной нагрузки потребителя, температуропроводности грунта и широты местности:  $a=5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , широта, град: 1 - 50,5; 2 - 46,5; 3 - 45;  $a=9,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , широта, град: 4 - 50,5; 5 - 46,5; 6 - 45.

Обобщение представленных данных по зависимости для оптимальной длины зонда получено в виде

$$h = 0,444(63,5 - \varphi) - 0,311 \cdot Q_0(51,3 - \varphi) + \frac{72 + 12,02 \cdot Q_0(31,14 - \varphi)}{a \cdot 10^7(41,4 - \varphi)}.$$

Область определяющих параметров  $Q_0 = (0,5-25) \text{ кВт}$ ,  $a_{\text{гр}} = (2,78 \dots 9,61) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\varphi = (45-51) \text{ град}$ .

**Выводы.** Для сезонного грунтового девятизондового аккумулятора основное влияние на шаг зондов по условиям наибольшей расчетной нагрузки отопления оказывает температуропроводность грунта. С ростом ее шаг зондов увеличивается и для грунтов, например, с теплофизическими свойствами известняка достигает 6 м. Длина зондов должна определяться с учетом расчетной нагрузки отопления, широты местности и температуропроводности грунта.

Предложены обобщающие зависимости, позволяющие по условию рационального режима работы гелиосистемы в круглогодичном режиме определять шаг зондов в кусте и длину зондов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Высочин, В.В. Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы гелиосистемы / В.В.Высочин, А.Ю. Громовой // Праці Одеського політехнічного університету. – Одеса, 2013. – Вип. 2(41). – С.148 – 152.

2. Накорчевский, А.И. Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников / А.И.Накорчевский, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, № 6. – С.27 – 31.
3. Накорчевский, А.И. Рациональные решения в теплогенерирующей системе «грунтовый массив - тепловой насос» / А.И.Накорчевский // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т.29, № 4. – С.77 – 82.
4. Высочин, В.В. Информационные аспекты внедрения систем контроля и планирования энергопотребления на котельных ЦСТ/ В.В.Высочин//Энергетика:економіка,технології, екологія. – 2017. - № 3. – С.107 – 111.