

В.В. Высочин, канд. техн. наук, доц.
Одесский национальный политехнический университет

ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА КОТЕЛЬНЫХ ЦСТ

Проведены численные исследования нестационарных процессов теплообмена в гелиосистеме с тепловым насосом и сезонным аккумулятором тепла с 9 грунтовыми вертикальными теплообменниками в процессе периодической, с суточным циклом, зарядки в летний период и разрядки в зимний. Математическая модель включает уравнения, описывающие условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе, теплообмен в грунтовых тепло-обменниках в трехмерном массиве грунта и процессы в тепловом насосе. Показана необходимость учета взаимного влияния грунтового теплообменника и теплового насоса, а также - возможность повышения эффективности аккумулятора путем выбора рационального шага куста и количества активных теплообменников в заданной структуре. Предложены рекомендации по выбору расчетной отопительной нагрузки и организации работы теплового насоса при условии полного обеспечения потребителя тепла в течение всего зимнего периода.

Ключевые слова: сезонный аккумулятор, гелиосистема, тепловой насос.

Введение. Гелиосистемы, предназначенные для отопления, как правило, включают сезонные аккумуляторы тепла и тепловые насосы (ТН). Наилучшими эксплуатационными показателями грунтовых аккумуляторов (ГА) выделяются вертикальные многозондные (кустовые) конструкции [2,4,5]. Зонды представляют собой трубчатые теплообменники, расположенные в скважинах. Кустовые структуры ГА различаются пространственным размещением, количеством зондов и размерами теплообменников. Перечисленные структурные факторы определяются условиями работы ГА в грунте, а также сопряженной гелиосистемы. Существенная нестационарность работы гелиосистемы усложняет исследования, в связи с чем в настоящее время отсутствуют надежные рекомендации по выбору рациональных параметров кустовых структур, в частности, конфигурации куста в плане, шага размещения зондов, длины теплообменников, а также характеристик сопряженных элементов системы: теплового насоса и поля гелиоколлекторов.

Анализ последних исследований и публикаций. Обычно структуру ГА предлагается выполнять в виде прямоугольного в плане куста с равным шагом между зондами. Однако параметры конструкции задаются из произвольных соображений [3,4]. В соответствии с данными [5] шаг расположения зондов в кусте оказывает 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 [5] показано, что с учетом этих двух факторов при зарядке ГА компромиссным для различных грунтов может быть выбран шаг равный 4,0 м, как соответствующий хорошей тепловой наполняемости ГА и достаточно высокой температуре.

Еще одним фактором влияния на эффективность закачки тепла является число активных зондов в кусте. Одиночный зонд существенно проигрывает кустовым ГА [2,5]. Вместе с тем существует рациональное количество зондов, влияющих на формирование температурного поля между ними. В [5] показано, что при переходе от пятизондового центросимметричного куста к девятизондовому, когда включаются в работу периферийные теплообменники, тепловая наполняемость ГА улучшается незначительно. Это объясняется перестройкой температурного поля в направлении снижения градиента температур, влияющего на теплообмен зондов и грунта. В результате, несмотря на увеличение теплообменной площади куста, теплоотдача отдельных теплообменников в девятизондовом кусте ниже, чем в пятизондовом. К тому же куст из пяти зондов при заданном шаге требует одну из самых низких удельную площадь гелиоколлекторов, определенную как отношение суммарной площади солнечных коллекторов к максимальному (пиковому) количеству тепла, накопленного в грунте [5]. Однако эти результаты, полученные при закачке ГА, для условий разрядки использованы быть не могут.

Целью работы является определение рациональных параметров структуры кустового ГА, работающего в режиме полного цикла зарядки и разрядки в сопряжении с гелиосистемой и ТН, и нагрузочных характеристик системы на основе математической модели с многофакторной целевой функцией.

Изложение основного материала. Для исследований принят ГА, состоящий из 9 вертикальных параллельно включенных теплообменников коаксиального типа высотой h и шагом расположения S . Теплообменники (зонды) в плане расположены по прямоугольной схеме 3×3 . Теплообмен в грунтовом теплообменнике описан системой дифференциальных уравнений энергетического баланса в трубах и теплоносителях [1], в грунте - уравнением нестационарной теплопроводности в прямоугольных координатах в трехмерной постановке [5]. Система уравнений решалась конечно-разностным методом. Материал труб теплообменника – пластик, диаметр внешних труб в соответствии с [5] принимался равным 180 мм. Теплоноситель – вода, в соответствии с этим охлаждение теплоносителя в испарителе ТН ограничивалось по условию недопущения фазового перехода.

В принятой постановке исследования учитывалось изменение температуры теплоносителя, циркулирующего между зондами и испарителем ТН. Влияние этого фактора отражается на эффективности работы испарителя, а также конденсатора ТН, что связано с изменением температурного режима в этих элементах и, как следствие, с соотношением размеров характерных зон подогрева и кипения, охлаждения и конденсации. Поэтому в общей системе уравнений использованы модельные соотношения, полученные в результате проведенных исследований нестационарной работы ТН с хладагентом R-12, которые позволяют определять характеристики ТН в переменных условиях.

Сопряжение грунтового теплообменника с гелиоколлекторами осуществлялось введением в расчетную модель системы уравнений, описывающих условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе [5]. Климатические условия работы гелиосистемы конкретизировались координатами одесского региона 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 $U/(\tau\alpha) = 4,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, где U – коэффициент потерь тепла; $(\tau\alpha)$ – оптическая характеристика гелиоколлектора.

В результате решения 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 системы теплоснабжения. Режим работы системы моделировался последовательной зарядкой ГА при работе гелиоколлекторов в летний период и разрядкой ГА в зимний период. Итерационным расчетом процесса закачки тепла определялась общая площадь гелиоколлекторов, тепловая производительность которых отвечала критерию заданной максимальной скорости теплоносителя (2 м/с) в грунтовых теплообменниках при фиксированной температуре теплоносителя на входе в теплообменник. Размеры поля гелиоколлекторов определяли температурное поле в грунте. Также итерационным методом определялись расчетная тепловая нагрузка отопления (Q_o) и расчетная (номинальная) тепловая нагрузка испарителя ТН (Q_n). Расчетная характеристика Q_o определялась по условию удовлетворения ежедневного графика тепловой нагрузки потребителя в течение всего периода отопления на протяжении 180 суток. Алгоритм модели позволял учитывать отпуск тепла потребителю в режиме «пропусков» - в зависимости от температуры теплоносителя на выходе из грунтового теплообменника. Нижними критериями определения Q_o являлись либо суточный недостаток тепла (недотоп), либо достижение минимальной температуры грунта – фоновой на среднем расстоянии между зондами и на глубине равной полувысоте зонда.

Исследования показали зависимость расчетной отопительной нагрузки при одних и тех же конструктивных характеристиках ГА и сопряженной с ним гелиосистемы от мощности ТН (рис.1, зонды глубиной 10 м в глиняном грунте). Это объясняется изменением во времени как температурных условий откачки тепла из грунта, так и потребности в теплоте. Следовательно, мощность ТН может быть фактором оптимизации Q_o .

На величину Q_o влияет количество активных зондов. Для примера, как видно на рис. 1, при переходе от 5 активных зондов к 9 наблюдается рост Q_o почти в 3 раза. Исходя из этого, влияние количества зондов на эффективность процесса при закачке тепла в ГА [5] и откачке различно. Очевидно, что структура куста должна быть девятизондовой, но при закачке тепла в целях экономии энергии на привод насосов крайние 4 зонда могут быть отключены в соответствии с [5].

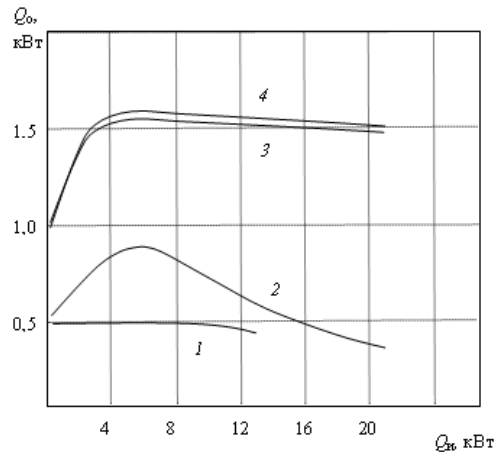


Рисунок 1 – Зависимость расчетной отопительной нагрузки потребителя от расчетной тепловой мощности испарителя теплового насоса с зондами глубиной 10 м в глиняном грунте. Шаг расположения зондов (м) и их активированное количество: 1 – 4/5; 2 – 6/5; 3 – 4/9; 4 – 6/9

Общей тенденцией при разных условиях, как видно из рис. 1, является экстремальный характер рассматриваемых зависимостей. Наибольшие значения функции Q_o достигаются при тепловой мощности испарителя Q_n близкой к 5 кВт. Примечательно, что это же значение тепловой мощности испарителя, которое можно назвать оптимальным - Q_n^{opt} , характерно и для работы зондов в других видах грунта: известняковом, песчаном. Оптимальной Q_n^{opt} отвечает и наибольшее, оптимальное, значение расчетной отопительной нагрузки - Q_o^{opt} .

Следует отметить, что сезонные затраты электроэнергии на привод ТН также изменяются в зависимости от мощности испарителя. Эта зависимость, так же, как и для отопительной нагрузки, имеет экстремальный характер, который устойчиво отвечает Q_n^{opt} при различных значениях шага куста и количестве активированных зондов.

На рис. 2 показана зависимость оптимальной расчетной отопительной нагрузки потребителя при фиксированной расчетной мощности испарителя, найденной как $Q_n^{opt} = 5$ кВт, от конструктивных факторов куста, а также от вида грунта. Как видно, шаг расположения зондов в кусте существенно влияет на рассматриваемую функцию. Увеличение шага приводит к росту Q_n^{opt} . Причем малые значения шага, до 2 м, оказываются непригодными для работы ГА. Значение шага куста, отвечающее наибольшему значению Q_n^{opt} , зависит от количества активированных зондов и теплофизических свойств грунта. Учитывая, как это следует из рис. 2, что наилучшие условия работы куста в процессе охлаждения имеют место при всех активированных зондах (9 единиц), можно найти оптимальный шаг S при наибольшем значении Q_n^{opt} : для песка – 4 м; для глины – 5 ... 5,5 м; для известняка – 6...6,5 м.

Анализ зависимости оптимальной расчетной мощности ТН по испарителю от вида грунта и глубины зонда при вариантном шаге зондов, определяемым в соответствии с проведенной оптимизацией, показал, что для зондов небольшой глубины (10 м) Q_n^{opt} практически не зависит от свойств грунта. При этом определяющей характеристикой свойств грунта является его температуропроводность - $a_{гр}$. С увеличением глубины h зависимость от $a_{гр}$ возрастает. Для оценки Q_n^{opt} может быть использовано обобщающее соотношение в области определяющих параметров $h = 10...49$ м, $a_{гр} = (2,78...9,61) \cdot 10^{-7}$ м²/с в виде, кВт

$$Q_n^{opt} = 7,0023 - 0,1842 \cdot h + a_{гр} (5,83 \cdot h - 56,34) \cdot 10^5.$$

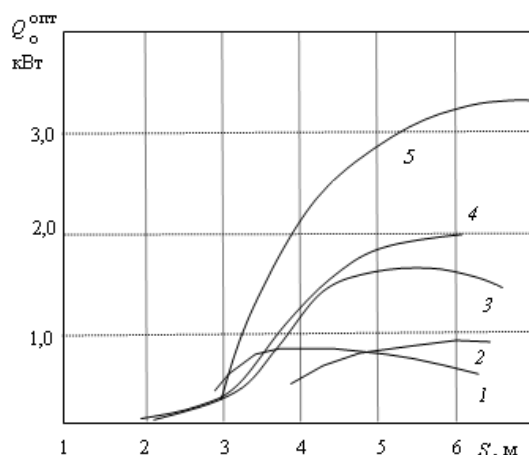


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной расчетной отопительной нагрузки потребителя (при $Q_{н} = 5$ кВт) для зондов глубиной $h=10$ м от их шага, вида грунта, количества активированных зондов: 1 – песок, 9 зондов; 2 – глина, 5; 3 – глина, 9; 4 – известняк, 5; 5 – известняк, 9

Анализ зависимости оптимальной отопительной нагрузки потребителя от вида грунта и глубины зонда показывает, что Q_0^{opt} в большей степени зависит от свойств грунта, чем Q_0^{opt} . Здесь при небольшой глубине зонда уже проявляется влияние температуропроводности грунта. С увеличением глубины зонда это влияние возрастает.

Обобщающее соотношение для оценки такой зависимости получено в виде, кВт

$$Q_0^{opt} = 2,27 \cdot 10^6 a_{гп} \exp(0,043 \cdot h) - 0,24 \exp(0,0403 \cdot h) .$$

Шаг зондов здесь также варьируется, как и в предыдущем случае. Область определяющих параметров $h = 10 \dots 49$ м, $a_{гп} = (2,78 \dots 9,61) \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Выводы. При кустовом способе организации сезонного аккумулятора наименьшей по количеству зондов эффективной структурой является девятизондовая, с шагом, зависящим от свойств грунта и высоты зонда. Предложены обобщающие зависимости, позволяющие по условию рационального режима работы системы теплоснабжения с геикоколлекторами в круглогодичном режиме определять расчетную отопительную нагрузку потребителя, производительность теплового насоса и размеры грунтового аккумулятора.

Список использованной литературы

1. *Высочин, В.В.* Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы геосистемы / 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 «грунтовой массив - тепловой насос» / А.И.Накорчевский // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т.29, № 4. – С.77 – 82.
4. *Трофименко, А.В.* Экспериментальные исследования рабочих режимов грунтового аккумулятора в системе теплоснабжения дома / А.В. Трофименко, А.А.Дмитренко, Д.П.Лапко, М.А.Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32, № 5. – С.67 – 71.
5. *Wysochin V.V.* Structural factors of solar system cluster ground coupled storage rationalization / V.V. Wysochin // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi – Odessa, 2015. – Issue 3(47). – P.47 – 51.

V. Wysochin, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
Odessa National Polytechnic University

**FACTORS OF A CHOICE OF HEATING LOADING OF A SOLAR PLANT SYSTEM
WITH THE SOIL ACCUMULATOR OF HEAT**

Numerical researches of non-stationary processes of heat exchange in 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 a daily cycle, charges during the summer period and discharges in the winter are conducted. The mathematical model includes the equations describing conditions of arrival and transformation of solar energy in heliocollectors, heat exchange in soil heat exchangers in a three-dimensional file of a ground and processes in the thermal pump. Necessity of the account of mutual influence of the soil heat exchanger and the thermal pump, and also - possibility of increase of efficiency of the accumulator by a choice of a rational step of a bush and quantity of active heat ex-changers in the set structure is shown. Recommendations for choice settlement heating loading and the organisation of work of the thermal pump under condition of full maintenance of the consumer of heat during all winter period are offered.

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

References

1. Wysochin, V.V. Role of the soil heat exchanger in smoothing of non-uniformity of work solar plant system / V.V.Wysochin, A.J.Gromovoj // Praci Odessjkiego politechnicznego universiteta. – Odessa, 2013. – Vyp. 2 (41). – S. 148–152. (Rus).
2. Nakorchevsky, A.I. Optimum design of soil heat exchangers / A.I. Nakorchevsky, B.I. Basok // Promyshlennaja teplotehnika. – 2005. – T. 27. –№ 6. - S. 27– 85. (Rus).
3. Nakorchevsky, A.I. Rational decisions in heat generating system «soil array - the thermal pump»// A.I. Nakorchevsky // Promyshlennaja teplotehnika. – 2007. – T. 29. –№ 4. - S. 77– 82. (Rus).
4. Trofimenko, A.V. Experimental researches of operating conditions of the soil accumulator in system of a heat supply of the house /A.V.Trofimenko, A/A/Dmitrenko, D.P.Lapko, M.A.Nazarenko// Promyshlennaja teplotehnika. – 2010. – T. 32. –№ 5. - S. 67– 71. (Rus).
5. Wysochin V.V. Strucural factors of solar system cluster ground coupled storage rationalization / V.V. Wysochin //Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi – Odessa, 2015. – Issue 3(47). – S.47 – 51. (Eng).

УДК 662.997+697.7

В.В. Височин, канд. техн. наук, доц.

**Одеський національний політехнічний університет
ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ПЛАНУВАННЯ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА КОТЕЛЬНИХ ЦСТ**

Проведено чисельні дослідження нестационарних процесів теплообміну в геліосистемі з тепловим насосом і сезонним акумулятором тепла з 9 ґрунтовими вертикальними теплообмінниками в процесі періодичної, з добовим циклом, зарядки в літній період і розрядки в зимовий. Математична модель включає рівняння, що описують умови приходу й перетворення сонячної енергії в геліоколекторі, теплообмін у ґрунтових теплообмінниках у тривимірному масиві ґрунту й процеси в тепловому насосі. Показано необхідність урахування взаємного впливу ґрунтового теплообмінника й теплового насоса, а також - можливість підвищення ефективності акумулятора шляхом вибору раціонального кроку куца й кількості активних теплообмінників у заданій структурі. Запропоновано рекомендації з вибору розрахункового опалювального навантаження й організації роботи теплового насоса за умови повного забезпечення споживача тепла усього зимового періоду.

Ключові слова: сезонний акумулятор, геліосистема, теплової насос.

Надійшла 16.05.2017
Received 16.05.2017