

УДК 662.997+697.7+697.329

**В.В. Высочин**, канд. техн. наук, доц.,  
**В.И. Моцный**, бакалавр,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА СОПРЯЖЕННЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ С ГЕЛИОСИСТЕМОЙ

**Введение.** Для рационального использования отопительных гелиосистем необходимым является применение сезонных аккумуляторов тепла, среди которых наиболее часто встречающиеся — грунтовые аккумуляторы [1]. Они могут представлять собой один или несколько трубчатых теплообменников, расположенных в вертикальных скважинах неограниченного грунтового массива. Выбор размеров теплообменников — многофакторная задача. Диаметр обсадной трубы коаксиального теплообменника может быть выбран по условию рационального соотношения площади поверхности стока тепла в грунт и остаточного теплосодержания теплоносителя [2]. Вторым параметром, в большой степени определяющим теплотехнические свойства теплообменника, является его длина. В настоящее время отсутствуют надежные рекомендации по выбору этого параметра.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Длина теплообменника (зонда) выбирается из разных представлений, которые, однако, в достаточной степени не аргументированы. Обычно длина теплообменника составляет 50...150 м [1,3], в зависимости от ожидаемой тепловой производительности. Однако при исследованиях эффективности грунтовых теплообменников влияние его длины обычно никак не учитывается. Задачи с рассмотрением теплопроводности в грунте решаются, как правило, в одномерной постановке. При этом температуру теплоносителя в теплообменнике принимают как среднюю для всей поверхности теплообмена, что вытекает из неопределенности размеров теплообменника. Задачу о целесообразности применения обобщенной системы, состоящей из гелиоконтра, теплового насоса и грунтового аккумулятора, решают не в сопряженном виде с рассмотрением процессов во взаимосвязи всех элементов, а частично: размеры гелиополя и мощность теплового насоса определяются в зависимости от необходимой тепловой нагрузки, размеры же грунтового теплообменника — произвольные [4].

Еще одним фактором, связанным с эксплуатацией грунтовых теплообменников, является скорость теплоносителя. Известно без обоснования, что скорость теплоносителя задается постоянной и в пределах 0,1...0,3 м/с [1]. В этом случае при переменной интенсивности солнечной радиации должна существенно изменяться температура теплоносителя, что крайне неудобно для его эксплуатации. Противоположные условия эксплуатации — при переменной скорости теплоносителя — в литературе не рассматривались. Таким образом, имеет место неопределенность в методических посылках при проектировании грунтовых теплообменников и выборе режима их работы.

**Цель.** Определение длины теплообменника при взаимном влиянии гелиоприемника и грунтового аккумулятора в процессе сезонной зарядки является целью работы. Постановкой цели предполагалось решение задачи поиска режимного параметра, удовлетворяющего сопряженной работе всех элементов обобщенной системы и влияющего на их конструктивные характеристики.

**Изложение основного материала.** Для исследования принят теплообменник коаксиального типа (труба в трубе), который обладает конструктивными преимуществами при размеще-

---

DOI: 10.15276/opus.1.43.2014.23

© В.В. Высочин, В.И. Моцный, 2014

нии в скважине [2]. Задача решалась с рассмотрением процессов переноса тепла в теплообменнике и грунте. Теплообмен в грунтовом теплообменнике описан системой дифференциальных уравнений энергетического баланса: 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 цилиндрических координатах в двумерной постановке. Для описания теплообмена зонда и грунта использовались граничные условия IV рода.

Система уравнений решалась конечно-разностным методом. Исследования проводились для четырех видов грунтов с коэффициентами теплопроводности:  $a_{гр1}=1,3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $a_{гр2}=2,78 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $a_{гр3}=5,5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $a_{гр4}=9,0 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Это соответствует морфологии таких грунтов: чернозем, песок, мергель плотный и глинистый известняк. Материал труб теплообменника — пластик, теплопроводность стенки  $\lambda_c=0,28$  Вт/(м·К). Диаметр внешних труб теплообменника принимался равным 180 мм [2]. Теплоноситель — вода.

Сопряжение грунтового теплообменника с гелиоколлекторами осуществлялось введением в расчетную математическую модель системы уравнений, описывающих условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе [5].

Условия работы гелиосистемы конкретизировались координатами одесского региона в период, который начинался 15 апреля (окончание отопительного сезона) и заканчивался через 6 месяцев. Для исследования приняты современные плоские гелиоколлекторы с приведенной характеристикой  $\frac{U}{(\tau\alpha)}=4,4$  Вт/(м<sup>2</sup>К) и вакуумированные с  $\frac{U}{\tau\alpha}=2,7$  Вт/(м<sup>2</sup>К), где  $U$  — коэффициент потерь теплоты;  $\tau\alpha$  — оптическая характеристика гелиоколлектора.

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

Скорость движения теплоносителя в грунтовом теплообменнике принимают неизменной в течение всего хода закачки теплоты — обычно в пределах 0,01...0,6 м/с [1]. В реальных условиях сопряженной работы гелиосистемы поддержка постоянной скорости произвольной величины приводит к появлению излишков теплоты, которые не могут быть закачены в аккумулятор, либо к нехватке теплоты для создания необходимого температурного фона в грунте. Это требует усложнения схемы, вплоть до включения в нее дополнительных устройств для отвода теплоты из контура. Постановкой задачи преследовалась цель определения необходимой скорости движения теплоносителя в теплообменнике при заданной температуре на его входе 70 °С. Выбирая предельно допустимую скорость движения теплоносителя в теплообменнике, можно управлять общей мощностью гелиосистемы, т.е. площадями поверхностей гелиоколлекторов и грунтового теплообменника.

Показаны зависимости скорости теплоносителя  $w$  на входе в теплообменник от времени закачки для двух суточных циклов: 60-го и 180-го (рис. 1). Видно, что скорость существенно неравномерна как в течение светового дня, так и в течение всего сезона закачки тепла. Характерным является рост скорости в первой половине светового дня и падение во второй. Максимальная скорость, суточный пик, в течение всего сезона закачки постоянно изменяется, и может достигать больших значений, которые существенно отличаются от принятых в начале сезона. Наибольшие значения скорости движения теплоносителя имеют место во второй половине сезона закачки. Это объясняется увеличением интенсивности инсоляции к этому периоду при одновременном росте температуры грунта. Последнее обстоятельство, вызывающее значительное термическое сопротивление в пристенной области теплообменника, требует поддерживать высокий температурный напор между теплообменником и грунтом, что достигается при повышении скорости теплоносителя. В этом случае возможен нерациональный режим работы системы.

Таким образом, существует необходимость ограничения максимального значения скорости движения теплоносителя. Ввиду существенного изменения скорости в течение рассматри-

ваемого періода роботи геліосистеми економічна оптимізація крайнє затруднителна. Рациональним може бути обмеження по умовам технічної цілесобразності. Для цього воспользуємося общепринятими рекомендаціями, обмежуючими швидкість руху води в теплообмінних пристроях величиною 2 м/с. Так виникає задача пошуку довжини теплообмінника при заданій площі поверхності геліоколекторів, яка б дозволяла на протязі всього періода закачки тепла підтримувати швидкість теплоносія  $w$  в прийнятних межах.

Визначено залежності довжини теплообмінника  $h$  від площі геліоколекторів  $A$  при умові обмеження швидкості руху теплоносія заданою величиною за весь період закачки тепла (рис. 2). Параметром для цих залежностей є теплофізична характеристика ґрунту — коефіцієнт температуропроводності  $a_{гр}$ .

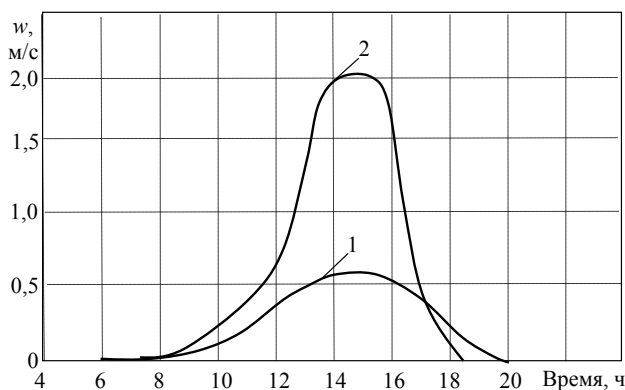


Рис. 1. Зміна швидкості теплоносія  $w$  на вході в ґрунтовий теплообмінник від часу закладки для двох суточних циклів закладки тепла: 60-го (1); 180-го (2)

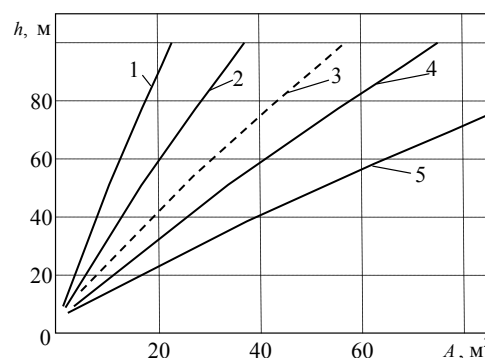


Рис. 2. Вплив площі  $A$  плоского (сплошні лінії) і вакуумізованого (пунктирна лінія) геліоколекторів на довжину  $h$  теплообмінника в ґрунтах з коефіцієнтом температуропроводності,  $a_{гр}$ :  $1,3 \cdot 10^{-7}$  (1);  $2,78 \cdot 10^{-7}$  (2);  $5,5 \cdot 10^{-7}$  (3);  $5,5 \cdot 10^{-7}$  (4);  $9 \cdot 10^{-7}$  м²/с (5)

Полученные зависимости по своему характеру адекватно коррелируются с общепринятой практикой, т.е. увеличение площади гелиоколлекторов требует повышения длины теплообменника. С уменьшением температуропроводности ґрунту влияние площади гелиоколлекторов на длину теплообменника снижается. Наибольшая зависимость длины теплообменника от площади гелиоколлекторов наблюдается для ґрунтов с высокой температуропроводностью — глинистых. Для небольших геліосистем влияние свойств ґрунту невелико.

**Результаты.** Обобщение полученных данных для плоского гелиоколлектора позволило получить следующее соотношение для определения длины теплообменника, м

$$h = 10,2 - \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{a_{гр}} + A \cdot \exp(2,28 - 4,8 \cdot 10^6 a_{гр});$$

для вакуумированного гелиоколлектора

$$h = 10 - \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{a_{гр}} + A \cdot \exp(2,5 - 4,8 \cdot 10^6 a_{гр}) .$$

Здесь приняты размерности: площадь поверхности гелиоколлекторов коэффициент температуропроводности  $a_{гр}$  (м²/с).

При сравнении геліосистем с разными коллекторами (см. рисунок 2, кривые 3 и 4), но работающими в равных условиях, следует, что вакуумированные коллекторы для ґрунтового теплообменника одинаковых размеров требуют меньшей площади, что объясняется их высокой эффективностью.

**Выводы.** Размеры грунтового теплообменника сезонного аккумулятора тепла в сопряженном режиме работы с гелиосистемой могут быть определены в зависимости от скорости движения теплоносителя, которая в сезонном цикле не должна превышать заданного значения. Такая граничная скорость принята равной 2 м/с. Предложенные обобщающие зависимости позволяют по условию ограничения скорости теплоносителя определить длину грунтового теплообменника при заданной площади поверхности гелиосистемы для различных грунтов и конструкций гелиоколлектора.

### Литература

1. Накорчевский, А.И. Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок // Пром. теплотехника. — 2005. — Т.27, № 6. — С.27 — 31.
2. Высочин, В.В. Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы гелиосистемы / В.В.Высочин, А.Ю.Громовой // Пр. Одес.политехн. ун-ту. — Одеса, 2013. — Вып. 2 (41). — С.148 — 152.
3. Накорчевский, А.И. Экспериментальная проверка достоверности математических моделей грунтового аккумулирования тепла / А.И. Накорчевский, А.Н. Недбайло, Б.И. Басок // Пром. теплотехника. — 2006. — Т. 28, № 2. — С. 51 — 62.
4. Ляшенко, Н.Е. Анализ экономической эффективности работы комбинированной гелиогрунтовой аккумуляционной теплонасосной системы теплоснажения / Н.Е. Ляшенко, А.А. Рутенко, А.Н. Недбайло // Пром. теплотехника. — 2011. — Т.33, № 4. — С. 82 — 86.
5. Высочин, В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла / В.В. Высочин // Пр. Одес.политехн. ун-ту. — Одеса, 2011. — Вып. 2 (36). — С. 125 — 129

### References

1. Nakorchevskiy, A.I. Optimal'naya konstruktsiya gruntovykh teploobmennikov [Optimal Design of Ground Heat Exchangers] / A.I. Nakorchevskiy, B.I. Basok // Prom. Teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. — 2005. — Vol. 27, # 6. — pp. 27 — 31.
2. Vysochin, V.V. Rol' gruntovogo teploobmennika v sglazhivanii neravnomernosti raboty geliosistemy [The role of the ground heat exchanger in leveling irregularity of solar plant system operation] / V.V. Vysochin, A.Yu. Gromovoy // Pr. Odes. Politekhn. un-tu. [Proc. Odesa Polytech. Univ.]. — Odesa, 2013. — Iss. 2 (41). — pp. 148 — 152.
3. Nakorchevskiy, A.I. Eksperimental'naya proverka dostovernosti matematicheskikh modeley gruntovogo akumulirovaniya tepla [Experimental validity check of ground heat accumulation mathematical models] / A.I. Nakorchevskiy, A.N. Nedbaylo, B.I. Basok // Prom. teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. — 2006. — Vol. 28, #2. — pp. 51 — 62.
4. Lyashenko, N.E. Analiz ekonomicheskoy effektivnosti raboty kombinirovannoy geliogruntovoy akumul'yatsionnoy teplonasosnoy sistemy teplosnabzheniya [The analysis of operation cost-effectiveness of a combined ground-sunlight accumulation heat pump heating system] / N.E. Lyashenko, A.A. Rutenko, A.N. Nedbaylo // Prom. teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. — 2011. — Vol. 33, #4. — pp. 82 — 86.
5. Vysochin, V.V. Matematicheskaya model' geliosistemy s sezonnyim akumul'yatorom tepla [Mathematical model of a solar plant system with a seasonal heat accumulator] / V.V. Vysochin // Pr. Odes. politekhn. un-tu [Proc. Odesa Polytech. Univ.]. — Odesa, 2011. — Iss. 2 (36). — pp. 125 — 129.

### АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

*В.В. Высочин, В.І. Моцний.* **Вплив розмірів грунтового теплообмінника на сполучені режими роботи з геліосистемою.** Проведено числові дослідження нестационарного теплообміну в сезонному акумуляторі тепла геліосистеми з грунтовим теплообмінником. В процесі періодичного, з добовим циклом, зарядження в літній період теплообмінник представлено у вигляді вертикального зонда з коаксіальним розташуванням труб. Математична модель сполученої роботи геліосистеми й грунтового акумулятора включає диференціальні рівняння, що описують умови переходу й перетворення сонячної енергії в геліоколекторі, а також — теплообмін у грунтовому теплообміннику й у масиві ґрунту. Показано необхідність урахування взаємного впливу розмірів геліоколекторів і грунтового теплообмінника. Цей вплив у заданих умовах може бути виражено у вигляді функціональної залежності від витратного параме-

тра — швидкості теплоносія в ґрунтовому теплообміннику. Запропоновано розрахункові співвідношення методу вибору довжини теплообмінника в залежності від площі геліоколекторів різного типу за умови обмеження швидкості теплоносія.

*Ключові слова:* ґрунтовий теплообмінник, сезонний акумулятор, геліосистема.

*V.V. Vysochin, V.I. Motsny. Влияние размеров ґрунтового теплообменника на сопряженные режимы работы с гелиосистемой.* Проведены численные исследования нестационарного теплообмена в сезонном аккумуляторе тепла гелиосистемы с ґрунтовым теплообменником в процессе периодической, с суточным циклом, зарядки в летний период. Теплообменник представлен в виде вертикального зонда с коаксиальным расположением труб. Математическая модель сопряженной работы гелиосистемы и ґрунтового аккумулятора включает дифференциальные уравнения, описывающие условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе, а также — теплообмен в ґрунтовом теплообменнике и в массиве ґрунта. Показана необходимость учета взаимного влияния размеров гелиоколлекторов и ґрунтового теплообменника. Это влияние в заданных условиях может быть выражено в виде функциональной зависимости от расходного параметра — скорости теплоносителя в ґрунтовом теплообменнике. Предложены расчетные соотношения метода выбора длины теплообменника в зависимости от площади гелиоколлекторов разного типа при условии ограничения скорости теплоносителя.

*Ключевые слова:* ґрунтовый теплообменник, сезонный аккумулятор, гелиосистема.

*V.V. Vysochin, V.I. Motsny. Effect of the ground heat exchanger dimensions on the heliosystem operation with coupled modes.* The numerical investigations of unsteady heat transfer in the seasonal heat accumulator of a solar plant system with a ground heat exchanger in the process of a periodic, with a diurnal cycle, charging in the summer period, are carried out. The heat exchanger is a vertical sonde with a coaxial tube arrangement. The mathematical model of conjugated operation of the heliosystem and the ground heat exchanger includes differential equations describing the conditions of entry and conversion of the solar energy in the sunlight collector, as well as the heat exchange in both the ground heat exchanger and in the array of ґround. The necessity of considering the mutual influence of dimensions of the sunlight collectors and of the ground heat exchanger is shown. Under given conditions this effect may be expressed as the functional dependence upon the cost characteristic, that is, the speed of the heat carrier in the ground heat exchanger. The method of choosing the heat exchanger length depending on the area of different heliocollectors, subject to the limitation of the heat-carrying velocity, is introduced.

*Keywords:* ground heat exchanger, seasonal heat accumulator, solar plant/heliosystem.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-та Денисова А.Є.

Поступила в редакцию 24 февраля 2014 г.

УДК 681.5:658.264.003.13

С.В. Бабич, инженер,  
В.О. Давыдов, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАЙОНОВ

**Введение.** Отопительная система современного украинского города представляет собой хаотичное распределение различных тепловых источников. Основой по-прежнему остается централизованное теплоснабжение, но в последнее время все больший процент потребителей осуществляет теплоснабжение крышными котельными. Наряду с этим также используются индивидуальные системы отопления на базе АГВ и тепловых насосов, а в самое холодное время

DOI: 10.15276/opus.1.43.2014.24

© С.В. Бабич, В.О. Давыдов, 2014