

УДК 621.577

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА И ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

В. А. Тарасова

кандидат технических наук*

e-mail: VAT1971@mail.ru

Д. Х. Харлампиди

кандидат технических наук

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного

НАН Украины ИПМаш

61046, Харьков, ул. Дм. Пожарского 2/10

тел. (0572) 94-27-94

e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua

А. В. Шерстюк

Аспирант*

E-mail: alexey_sherstyuk@mail.ru

*Кафедра теплотехники

НТУ «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Запропоновано комплексний підхід до проектування ґрунтового теплообмінника, що дозволяє врахувати взаємний вплив режимів теплоспоживання об'єкта і збору тепла з ґрунтового масиву протягом періоду експлуатації теплонасосної установки

Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, теплонасосна установка

Предложен комплексный подход к проектированию ґрунтового теплообменника, позволяющий учесть взаимное влияние режимов теплотребления объекта и сбора тепла с ґрунтового массива в течение периода эксплуатации теплонасосной установки

Ключевые слова: ґрунтовый теплообменник, теплонасосная установка

A complex approach to the design of the ground sources heat exchanger, which allow taking into account in calculation of its constructive parameters the interaction of the regimes of heat supplying of the heating system and heat extraction from the soil, have been proposed

Key words: ground sources heat exchanger, heat pump installation

Введение

Использование низкопотенциальной теплоты приповерхностных слоев ґрунта с помощью теплонасосных установок (ТНУ) является одним из эффективных способов энергосбережения в объектах жилищно-коммунального сектора.

Формирование теплового режима приповерхностного ґрунта, а речь идет о глубинах до 10 м, происходит под влиянием солнечной радиации, температуры наружного воздуха и атмосферных осадков. Приповерхностный ґрунт подвержен четко выраженным сезонным и суточным колебаниям температуры. Динамика изменения температуры ґрунта на разных глубинах, а соответственно и переменный тепловой режим системы теплосбора с массива ґрунта влияет на изменение режимов работы ТНУ и системы отопления. Кроме того, имеет место и обратная ситуация, когда изменение режимов теплотребления объекта, вызывает изменение режимов работы ТНУ, что в свою очередь влияет на характеристики системы тепло-

сбора и температурное поле возле ґрунтового теплообменника (ГТ). Таким образом, при проектировании геотермальных ТНУ необходим комплексный подход, который предусматривает рассмотрение системы: «источник теплоты – ТНУ – потребитель» как единого целого, с учетом взаимовлияния параметров основных подсистем.

Постановка задачи исследования

Из практики известно [1], что при эксплуатации системы теплосбора в течение отопительного периода возможно понижение температуры вблизи ГТ. В межотопительный период, когда ГТ не эксплуатируется, ґрунт должен прогреваться, теоретически, до начальной температуры, соответствующей его непотревоженному состоянию. Однако часто этого не происходит, поэтому к началу следующего отопительного периода ґрунт имеет пониженный температурный потенциал. Неправильный выбор температурных режимов ТНУ

и высокая интенсивность ее эксплуатации, особенно в начальный период, может привести к быстрому истощению энергетического потенциала грунта. Вопрос устойчивости температурного поля грунта к периодическому воздействию процессов съема и подвода теплоты, является одним из важных при проектировании объектов с ТНУ. Под устойчивостью, в данном случае, следует понимать способность грунтового массива восстанавливать свою температуру, соответствующую его непо потревоженному состоянию. Анализ этого процесса, позволит определить характер и продолжительность периода релаксации грунта, оценить предельно возможную величину теплосъема с грунтового массива при заданных характеристиках ГТ, а также выбрать оптимальные условия эксплуатации ТНУ.

Следующим вопросом, являлось рассмотрение комплексного подхода к проектированию ГТ горизонтального типа с учетом теплового состояния грунта и режимов теплотребления объекта. В отличие от традиционного подхода, когда расчет ГТ производится на некую минимальную или же максимальную величину теплосъема, предлагаемый нами подход предусматривает выбор конструктивных параметров ГТ на основе анализа величин удельного теплосъема с массива грунта для каждого месяца отопительного периода с учетом режима работы ТНУ.

Основные предпосылки к применению комплексного подхода к проектированию геотермальных ТНУ на наш взгляд следующие.

Из опыта эксплуатации геотермальных ТНУ известно, что режим постоянного расхода хладоносителя через ГТ способствует повышению коэффициента преобразования ТНУ η , однако при этом температура хладоносителя на входе в ГТ T_{s2} будет изменяться в зависимости от изменения тепловой мощности ТНУ в течение отопительного периода. Из этого следует вывод, что при проектировании геотермальных ТНУ с постоянным расходом хладоносителя через ГТ нельзя произвольно задаваться величиной T_{s2} . Она должна быть получена на основе совместного расчета ГТ и ТНУ для каждого месяца отопительного периода. Для этого необходимо решение двух взаимосвязанных задач. Первая задача, предусматривает расчет нестационарного температурного поля грунтового массива. Вторая задача связана с определением рациональных термодинамических режимов работы ТНУ с учетом теплового состояния грунта и характера теплотребления объекта в течение отопительного периода.

Расчет нестационарного температурного поля грунтового массива

Рассмотрим задачу определения температурного поля массива грунта вблизи горизонтального ГТ при его эксплуатации.

Изменение температурного поля грунта находится путем решения краевой задачи теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

при этом граничными условиями являются условия третьего рода.

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:

T – температура грунта, °С; t – время, с; a – температуропроводность грунта, м²/с.

На рис. 1 представлена схема массива грунта с полиэтиленовым трубопроводом (внешний диаметр $d_2=0,040$ м, внутренний диаметр $d_1=0,035$ м), проложенным на глубине $h=1,5$ м, в качестве грунтового теплообменника. Внутри рассматриваемого ГТ змеевиком типа, заложеного с шагом между петлями $b=1$ м, прокачивается хладоноситель, 30% раствор этиленгликоля, со скоростью 1 м/с.

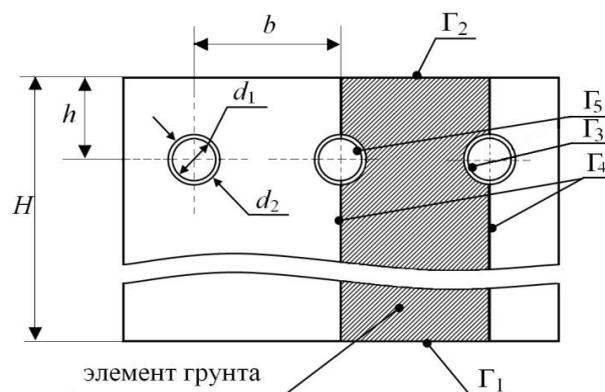


Рис. 1. Схема массива грунта с проложенным ГТ змеевико-вого типа

При формировании математической модели был выбран элемент грунта шириной $b=1$ м и глубиной $H=10$ м (рис. 1). Модель позволяла варьировать этими величинами.

Одним из важных вопросов при расчете температурного поля ГТ, является вопрос корректного задания граничных условий, которые соответствовали бы реальному физическому процессу в массиве грунта.

В качестве начальных условий принималось равномерное распределение температуры в элементе грунта $T_0 = \text{const}$, при этом начальная температура T_0 задавалась равной среднегодовой температуре наружного воздуха.

Были приняты следующие граничные условия (рис.1):

- на границе Γ_1 было задано граничное условие второго рода $q=\text{const}$. Согласно [2] значение радиогенной теплоты для зоны Центральной Европы принимается равным $0,1$ Вт/м²;

- на границе Γ_2 были учтены сезонные колебания температуры наружного воздуха и задано условие третьего рода

$$\alpha(T - T_c) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта к наружному воздуху, Вт/(м²×К); T – температура грунта, °С; T_c – среднемесячная температура наружного воздуха, изменяющаяся в течение года, оС.

- на границах Γ_3 и Γ_5 было задано условие третьего рода

$$\alpha_{\text{тр}}(T - T_s) = -\lambda_{\text{тр}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{тр}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к хладоносителю (рассолу), Вт/(м²×К);

T_s – температура рассола, °C; λ_{tr} – коэффициент теплопроводности трубы, Вт/(м×K);

$$\text{на границе } \Gamma_4 - \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{n=0} = 0.$$

Для решения уравнения (1) с краевыми условиями использовался метод конечных элементов [5].

Коэффициент теплоотдачи a от грунта к наружному воздуху в (2) находился методом итераций, при этом решалась задача для непоколебленного грунта, т.е. на границах Γ_3 и Γ_5 было задано условие

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{n=0} = 0.$$

В первом приближении значение a принималось равным 6 Вт/(м²×K) [3]. Далее, в результате решения нестационарной задачи теплопроводности в двумерной постановке получено распределение температуры на поверхности грунта в течение года. После чего, проведен уточненный расчет коэффициента теплоотдачи с учетом полученных разностей между температурами окружающей среды и поверхностью грунта для каждого месяца. С использованием известных критериальных соотношений для свободной конвекции [6] находились осредненные по месяцам коэффициенты теплоотдачи от грунта к наружному воздуху $a=f(t)$.

Для проверки адекватности выбранного подхода при задании граничных условий физическому процессу распределения температуры в массиве грунта, проведено сопоставление результатов, полученных численным методом и с использованием эмпирических [4], а также аналитических уравнений, предложенных в работе [7].

На рис. 2 представлены зависимости распределения температуры грунта в течение года по глубине, полученные численным методом (сплошная линия) и с использованием эмпирической формулы (пунктирная линия), приведенной в работе [4]. Как видно имеет место достаточно точное совпадение результатов с разницей в 1 °C, несмотря на то, что при задании граничных условий на Γ_2 не учитывалось влияние покрова грунта (снег, растительность и т.д.) и ряда других факторов.

Длина трубопровода ГТ с учетом изменения теплосъема с массива грунта по длине теплообменной поверхности ГТ при течении хладагента (30 % раствор этиленгликоля) рассчитывалась по следующему алгоритму:

Для задания граничных условий III рода на внутренней поверхности трубы (граница Γ_3 , рис. 1), определялся коэффициент теплоотдачи от хладагента на участке ΔL_n . Теплофизические свойства хладагента находились при средней температуре

$$T_s^{cp} = \frac{T_{s2}^A + T_{s1}^A}{2}, \tag{4}$$

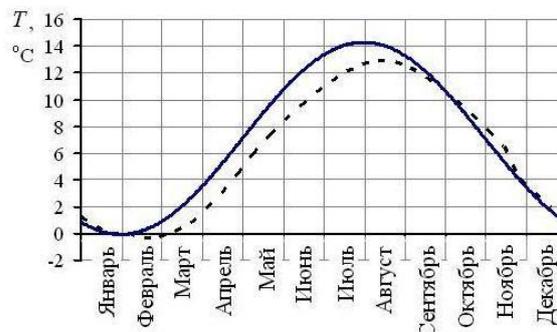
где T_{s2}^A – температура на входе в участок ГТ длиной ΔL ; T_{s1}^A – температура на выходе из участка ГТ длиной ΔL .

В первом приближении считалось, что температура на входе в ГТ T_{s2}^A равна температуре T_{s1}^A , таким образом $T_s^{cp} = T_{s2}^A$.

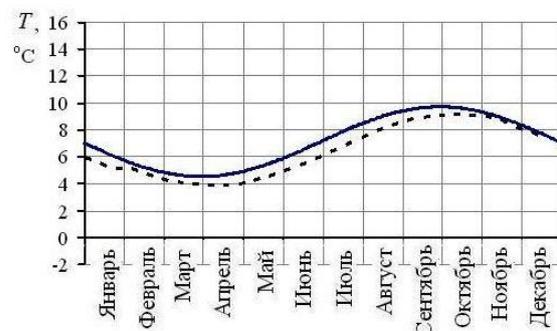
Для расчета коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности ГТ к рассолу использовались из-

вестные критериальные уравнения для вынужденного течения жидкости в трубах [6].

Если температуры хладагента на входе в ГТ в течение года изменяются, то для каждого месяца получаем различные значения коэффициента теплоотдачи на участке ΔL_n .



а



б

Рис. 2. Результаты сопоставления графиков колебаний температуры грунта в течение года, полученных численным и среднестатистическим методами: а – на глубине 1 м; б – на глубине 3 м

Путем решения нестационарной задачи теплопроводности в двумерной постановке с заданными граничными условиями, используя метод конечных элементов, определяем распределение температуры в выделенном элементе грунта (рис. 1), а также значения температур стенки на внутренней поверхности трубы (Γ_3) в течение отопительного периода. Для нахождения теплового потока с грунта находим осредненные значения температур стенки T_w^o по внутренней поверхности трубы. Значения T_w^o также усреднялись и по каждому месяцу отопительного периода.

Тепловой поток, отводимый хладагентом, определяется по формуле

$$Q_{AL} = \alpha_{ГТ} (T_{сг}^{cp} - T_w^o) \pi d_1 \Delta L, \text{ Вт}$$

где $\alpha_{ГТ}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к рассолу (скорость течения $w=1$ м/с); d_1 – внутренний диаметр трубы, равный 0,032 м.

Из уравнения теплового баланса определяется температура T_{s1}^A на выходе из участка ΔL для каждого месяца

$$Q_{\Delta L_n} = \alpha_{ГТ} \pi (T_{СТ}^{cp} - T_s^{cp}) \pi d_1 \Delta L_n = \frac{\rho w \pi d_1^2}{4} c_p (T_{s1}^{\Delta} - T_{s2}^{\Delta})$$

$$T_{s1}^{\Delta} = T_{s2}^{\Delta} + \frac{4Q_{\Delta L_n}}{\rho w \pi d_1^2 c_p} \quad (5)$$

Расчет повторяется с п. 1. При этом в (4) подставляется полученное значение T_{s1}^{Δ} и определяется уточненное значение агт.

Для нахождения величины теплосъема со следующего участка трубы ΔL_{n+1} значение T_{s1}^{Δ} , полученное по (5), присваивается значению температуры на входе в следующий участок $T_{s2}^{\Delta} = T_{s1}^{\Delta}$. Далее расчет повторяется с п. 1.

Расчет ведется совместно с расчетом статических характеристик ТНУ до выполнения условия, когда сумма теплосъемов с участков ГТ будет покрывать тепловую мощность испарителя ТНУ (холодопроизводительность) или превышать ее для каждого месяца отопительного периода. $Q_0^3 \sum_{n=1} Q_{\Delta L_n}$, а температуры на

входе и на выходе из ГТ и из испарителя ТНУ будут равны. Если по температурам не выполняется, то статические характеристики ТНУ пересчитываются при этом температура на входе в испаритель принимается равной температуре на выходе из ГТ.

Полная длина трубопровода ГТ равна сумме участков $L = \sum_{n=1} \Delta L_n$.

Определение рациональных термодинамических режимов работы ТНУ с учетом теплового состояния грунта

Проведем предварительный анализ теплового потенциала грунта. Рассмотрим следующие возможные режимы подачи хладоносителя в ГТ от ТНУ:

1-й режим, ТНУ работает только в зимний период. В течение всего отопительного периода температура хладоносителя на входе в ГТ принимается постоянной, равной, к примеру, $T_{s2} = -3^{\circ}C$. Следует отметить, что данный режим нецелесообразен с точки зрения обеспечения эффективной эксплуатации ТНУ. Поскольку поддержание постоянной T_{s2} при снижении теплопроизводительности ТНУ в холодные месяцы отопительного периода сопряжено с понижением температуры испарения, а соответственно и уменьшением m . Однако такой прием позволяет провести качественный анализ теплового состояния грунта для каждого месяца отопительного периода;

2-ой режим, ТНУ эксплуатируется в отопительный период, обеспечивая постоянную температуру хладоносителя на входе в ГТ ($T_{s2} = -3^{\circ}C$), а также в межотопительный период, покрывая нагрузку по кондиционированию объекта ($T_{s2} = 21^{\circ}C$);

3-ий режим, ТНУ работает в зимний период при изменяющейся температуре хладоносителя с октября по март соответственно $T_{s2} = -1, -2, -3, -4, -4, -3^{\circ}C$, а в летний – с постоянной температурой подачи рассола в ГТ $T_{s2} = 21^{\circ}C$. Значения T_{s2} задаются, ориентируясь на величину минимального температурного напора в $5^{\circ}C$ между температурой рассола и температурой грунта

вблизи ГТ на расстоянии 0,1 м для каждого месяца отопительного периода 2-го режима работы ТНУ.

На рис. 3 для трех режимов приведен удельный теплосъем с грунта по месяцам. В данном случае не рассматривался процесс интерференции, считалось, что в грунте заложена одна прямая труба и на Г5 (рис. 1) задавалось условие $(\frac{\partial T}{\partial n})_{n=0} = 0$.

Как видно из рис. 3, наибольший теплосъем с грунта имеет место в режиме 2, т.к. сброс теплоты с конденсатора ТНУ, работающей в режиме летнего кондиционирования в ГТ позволяет сократить период восстановления температурного поля грунта к началу следующего отопительного сезона.

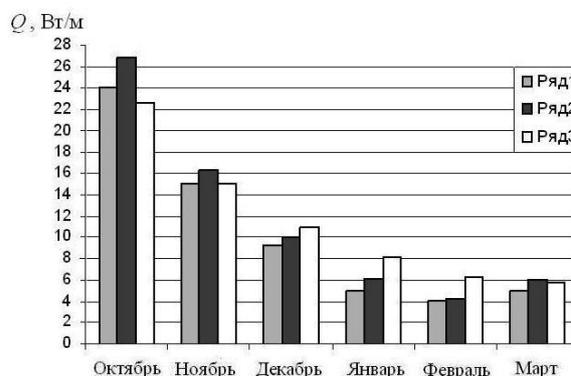


Рис. 3. Тепловой поток (Вт/м) при работе ТНУ в следующих режимах: ряд 1 – режим 1; ряд 2 – режим 2; ряд 3 – режим 3

Между тем видно, что подача хладоносителя в ГТ с температурой $T_{s2} = -3^{\circ}C$ в октябре месяце не рациональна в условиях эксплуатации ТНУ, поскольку такой режим сильно «истощает» грунт и в зимний период, когда растет теплотребление объекта, удельный теплосъем с грунта уже невысок. Предпочтительным представляется режим 3, при котором теплосъем в течение отопительного сезона выше, чем в предыдущих режимах. Поэтому при проектировании в первом приближении он и может быть выбран в качестве расчетного. В последующих приближениях T_{s2} определяется на основе расчета статических характеристик ТНУ с учетом изменения режимов теплоснабжения объекта при различных температурах наружного воздуха.

В зависимости от того, в какой системе отопления предполагается эксплуатация ТНУ, также зависит и режим работы ГТ, поскольку тепловая мощность испарителя изменяется с учетом изменения нагрузки конденсатора.

Как известно [1], наиболее характерными для работы в системе отопления ТНУ, являются два режима. Первый режим работы – моновалентный, когда ТНУ покрывает всю нагрузку системы отопления. При этом система отопления создается низкотемпературной с параметрами теплоносителя в подающей и в обратной магистрали в расчетном режиме 55/45 $^{\circ}C$. Второй режим работы ТНУ – бивалентно-альтернативный, согласно которому ТНУ покрывает отопительную на-

грузку и обеспечивает требуемые температуры теплоносителя в подающей и обратной магистрали только до определенной температуры наружного воздуха (точка бивалентности), далее нагрузку покрывает котел-доводчик. В этом случае система водяного отопления, является высокотемпературной с расчетными параметрами теплоносителя 95/70 °С.

В качестве тестовой задачи для проверки работоспособности предложенной методики расчета ГТ, моделировались режимы работы одной и той же ТНУ для различных систем отопления.

Для случая бивалентного режима работы ТНУ теплопотребление объекта при расчетной температуре наружного воздуха составляло 35 кВт. Для моновалентного режима ТНУ теплопотребление объекта равно 15 кВт. Основные режимно-конструктивные характеристики ТНУ: массовый расход хладагента в ГТ 1,01 кг/с; массовый расход теплоносителя 0,33 кг/с; Объемная подача компрессора 29 м³/ч; поверхность испарителя 6,7 м²; поверхность конденсатора 6,8 м²; длина ГТ 1600 м; глубина заложения 1,5 м. Хладагент ТНУ - R134a.

Температура теплоносителя на входе в конденсатор ТНУ принималась равной температуре в обратной магистрали системы отопления. Для рассматриваемых систем отопления предварительно были построены графики качественного регулирования. Статические характеристики ТНУ определялись при помощи методики [8, 9]. При анализе работы ТНУ принимался постоянный расход теплоносителя в системе отопления в обоих режимах.

Расчетные характеристики ТНУ для различных систем отопления приведены в табл. 1. Сопоставление режимов работы ГТ длиной L=1600 м и ТНУ по каждому месяцу отопительного периода приведено на рис. 4. Длина грунтового теплообменника L определена по выше приведенному алгоритму при условии обеспечения требуемой холодопроизводительности ТНУ по каждому месяцу отопительного периода.

В расчетах ГТ и ТНУ учитывался режим кондиционирования, при котором в летний период на вход ГТ подается рассол с постоянной расчетной температурой T_{s2} = 21°С. При реверсировании холодильного цикла для работы ТНУ в режиме кондиционирования температура конденсации фреона, а, следовательно, и Ts2 практически не подвержены колебаниям и остаются фактически постоянными. Это обусловлено тем, что температура грунта на глубине заложения ГТ в течение

трех летних месяцев изменяется незначительно от 16 до 18 °С.

Как можно видеть из представленных зависимостей на рис. 4, при выбранных режимно-конструктивных параметрах ГТ его тепловая мощность (кривая 1) покрывает требуемую холодопроизводительность ТНУ (кривая 2).

Таблица 1

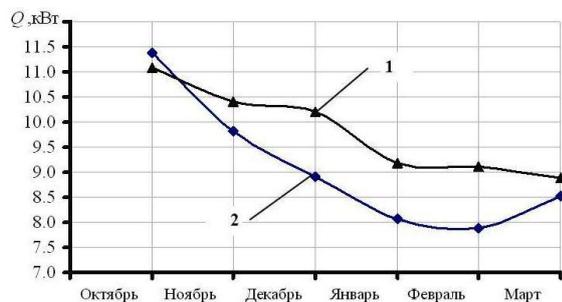
Расчетные характеристики ТНУ «рассол-вода» (компрессор ZH75K4E-TWD Copeland) при работе в низкотемпературной (верхняя строка) и высокотемпературной (нижняя строка) системах отопления

Параметры	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
Среднемесячная температура наружного воздуха, °С	8	-1	-5	-9	-6	0
Теплопроизводительность ТНУ, кВт	15,21	14,17	13,31	12,39	12,18	12,47
	15,21	14,16	13,34	-	-	12,69
Холодопроизводительность ТНУ, кВт	11,38	9,81	8,90	8,07	7,88	8,53
	11,23	9,55	8,31	-	-	8,4
Потребляемая мощность компрессора, кВт	4,91	5,82	5,99	6,52	6,03	5,36
	5,13	6,24	7,06	-	-	5,92
Температура рассола на входе в испаритель ТНУ, °С	9,22	5,8	2,77	0,57	-0,64	-0,28
	9,22	5,8	2,77	-	-	0,50
Температура рассола на выходе из испарителя ТНУ	7,19	3,99	1,065	-1,007	-2,24	-1,98
	7,23	4,053	1,20	-	-	-1,15
Температура испарения, °С	-1,13	-3,15	-5,41	-6,87	-8,07	-8,14
	-0,99	-2,91	-4,86	-	-	-7,22
Температура теплоносителя на входе в конденсатор ТНУ, °С	32,0	40,0	42,0	46,0	43,0	38,0
	33,8	43,0	49,0	-	-	42
Температура теплоносителя на выходе из конденсатора ТНУ, °С	42,90	50,15	51,54	55,12	51,88	46,93
	44,70	53,15	58,56	-	-	51,09
Требуемая температура теплоносителя в подающей магистрали, °С	38,0	47,0	50,0	55,0	51,0	41,0
	39,1	52,4	59,0	71,1	61,9	51,0
Температура конденсации, °С	49,21	56,02	57,06	60,39	57,02	52,10
	51,00	59,02	64,09	-	-	56,35
Коэффициент преобразования ТНУ	3,09	2,43	2,22	1,95	2,05	2,32
	2,96	2,26	1,88	-	-	2,14

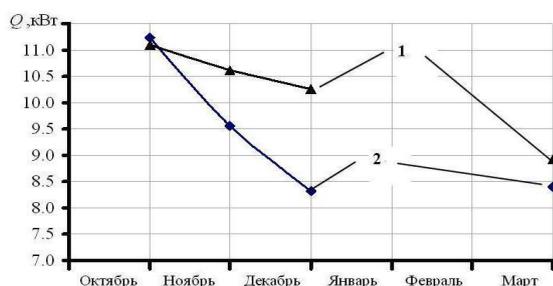
Уменьшение холодопроизводительности ТНУ с декабря по март связано с увеличением температурных границ цикла, обусловленных возрастанием теплопотребления объекта в этот период.

Изменение режимов работы ТНУ влияет на характеристики ГТ следующим образом. При бивалентно-альтернативном режиме отопления в марте месяце температура рассола на входе в испаритель ТНУ по сравнению с моновалентным режимом будет на 1,22 °С выше (см. табл. 1). Это обусловлено тем, что два зимних месяца отбор теплоты из грунта не осуществляется и температурный потенциал грунта не истощается. Однако, коэффициент преобразования ТНУ в бивалентно-альтернативном режиме работы ТНУ в марте все же ниже на 7,75 %. Это связано с тем, что в этот период теплоноситель из системы отопления поступает в конденсатор с более высокой температурой (42 °С), чем при моновалентном режиме (38 °С) и его параметры

оказывают гораздо большее влияние на изменение m , чем параметры россола в испарителе.



а

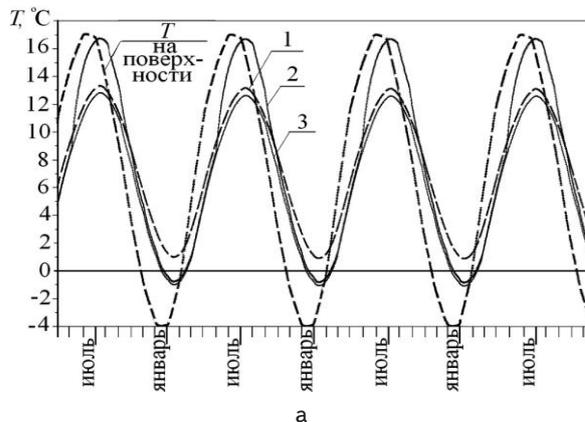


б

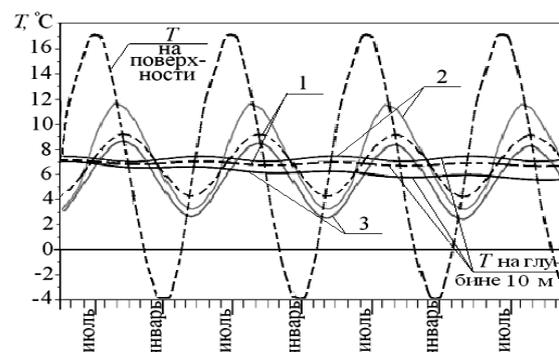
Рис. 4. Сопоставление тепловой мощности ГТ длиной $L=1600$ м и холодопроизводительности ТНУ: а – при моновалентном режиме; б – при бивалентном режиме

Ниже представлены зависимости изменения температуры грунта на глубине 1 м (рис. 5 а) и 3 м (рис. 5 б), полученные при заложении ГТ на глубине 1,5 м для моновалентного режима работы ТНУ, а также для непотревоженного состояния грунта.

Как видно из рис. 5 а на температуру грунта на глубине 1 м оказывает большое влияние колебание температуры наружного воздуха, а также отбор тепла ГТ, заложенным глубине 1,5 м. Аккумуляция тепла в грунте за счет сброса теплоты конденсации ТНУ в летний период на глубине 1 м не наблюдается. Это можно видеть из рис. 5 а, на котором показано, что температура грунта по линии 2 для отопительных периодов последующих годов эксплуатации ТНУ, фактически, равна температуре по линии 3 и только в феврале месяце не намного превышает ее. На глубине 3 м (рис. 5 б) аккумуляция тепла более ощутима, поэтому разность между температурами грунта для указанных режимов эксплуатации больше. При работе ТНУ только в режиме отопления температура грунта на глубине 3 м к марту месяцу становится ниже на 2°C по сравнению с его непотревоженным состоянием.



а



б

Рис. 5. Зависимость температуры грунта на глубине 1 м (а) и 3 м (б) от времени при следующих условиях: 1– непотревоженное состояние грунта; 2– при работе ТНУ в моновалентном режиме в отопительный период и в режиме кондиционирования в летний период; 3– при работе ТНУ только в режиме нагрева в отопительный период

В целом, аккумуляция тепла грунтом в летний период работы ТНУ способствует восстановлению его теплового потенциала, т.е. повышает тепловую устойчивость. В качестве иллюстрации этого на рис. 5 б показано изменение температуры грунта на глубине 10 м. Как можно видеть, при работе ТНУ только в режиме отопления к 4-му отопительному сезону температура грунта на глубине 10 м будет на $1,5^{\circ}\text{C}$ ниже по сравнению с его непотревоженным состоянием, чего не наблюдается при работе в режиме с кондиционированием.

При проектировании ГТ змеевикового или коллекторной схемы прокладки следует учитывать влияние тепловой интерференции между параллельно проложенными участками трубопровода [2]. В настоящей работе нами исследовано влияние тепловой интерференции на величину удельного теплосъема с грунта для ГТ змеевикового типа при работе ТНУ в моновалентном режиме. Для определения влияния интерференции на границах Γ_3 и Γ_5 (см. рис. 1) задавалось условие III рода. Анализ результатов расчета показал, что имеет место в среднем двукратное уменьшение удельного теплосъема с грунта при прокладке труб ГТ

с шагом в 1 м по сравнению с прокладкой одиночной трубы при прочих равных условиях.

Как отмечалось ранее, предлагаемая нами методика расчета предполагает учет изменения величины теплосъема с грунта к ГТ с уточнением температуры рассола по его длине. На рис. 6 показано как влияет учет изменения теплосъема с грунта по длине трубопровода ГТ, а также учет тепловой интерференции на проектную длину ГТ.

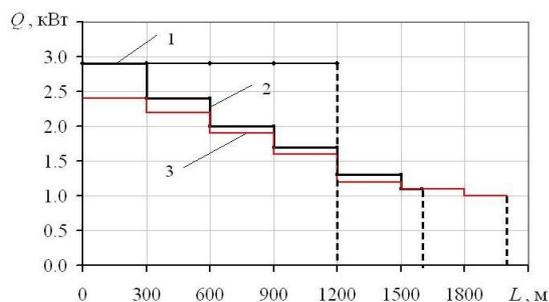


Рис. 6. Выбор проектной длины ГТ в зависимости от способа расчета теплосъема с грунта: 1- при постоянном теплосъеме по длине ГТ; 2 - при переменном теплосъеме по длине ГТ, но без учета тепловой интерференции; 3 — при переменной величине теплосъема по длине ГТ змеевикового типа, с учетом тепловой интерференции между участками трубопровода.

Как видно из рис.6 для обеспечения требуемой холодопроизводительности ТНУ $Q = 11,4$ кВт (октябрь месяц), проектная длина ГТ в зависимости от учета влияния соответствующих параметров может изменяться от $L=1200$ м до $L=2000$ м.

Выводы

1. Предложена методика расчета грунтового теплообменника горизонтального типа, которая позволяет сделать долгосрочный прогноз восстановления теплового состояния грунта при чередовании режимов отбора и сброса теплоты в грунт. Методика учитывает влияние тепловой интерференции между участками грунтового теплообменника, а также изменение температуры хладоносителя по его длине.
2. Комплексный подход к проектированию геотермальных ТНУ позволяет решить вопрос нахождения рациональной длины ГТ с нескольких позиций: обеспечение максимальной энергетической эффективности ТНУ; сокращение периода восстановления температурного потенциала грунта.
3. Эксплуатация ГТ в сочетании с бивалентной схемой работы ТНУ в зимний период и соответственно для кондиционирования в летний период приводит к снижению теплового воздействия на грунт, однако при этом уменьшается и энергетическая эффективность ТНУ отнесенная к числу часов использования ее установленной мощности.
4. Восстановление температурного поля грунта вокруг теплообменника после окончания эксплуатации ТНУ зависит как от теплофизических свойств грунта, так и от интенсивности использования установленной мощности ТНУ.
5. С повышением T_{s2} увеличивается проектная длина ГТ, при этом также увеличивается коэффициент преобразования ТНУ m . Понижение T_{s2} приводит к уменьшению длины ГТ, но при этом снижается m . При снижении T_{s2} и повышении температуры воды на входе в конденсатор T_{w1} величина m уменьшается, однако при этом уменьшается и проектная длина ГТ. При повышении T_{s2} и понижении T_{w1} повышается m , но увеличивается длина ГТ при прочих равных условиях.
6. При прочих равных условиях учет тепловой интерференции при расчете приводит к увеличению проектной длины ГТ.
7. Разработанная модель позволяет при проектировании ГТ выбрать наиболее рациональную глубину его заложения, учитывая степень влияния колебаний температуры наружного воздуха на величину теплосъема с грунта в отопительный период.
8. Предложенный подход может быть использован не только при проектировании новых объектов с ТНУ, но и для проверочных оценок эффективности существующих объектов, корректировке режимных параметров системы теплосбора.

Литература

1. Денисова. А. Е. Интегровані системи альтернативного теплопостачання для енергозберігаючих технологій: Автореф. дис... доктора техн. наук: 05.14.06/ОНПУ. – Одеса, 2003. – 36 с.
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной энергии поверхностных слоев Земли/ Г.П. Васильев. – М.: Издательский дом «Граница», 2003. – 176 с.
3. ДБН В.2.6-31:2006 Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель/ Мінбуд України, Київ, 2006.
4. Денисова А.Е. Использование энергии грунта в теплонасосных геосистемах энергоснабжения [Текст] / А.Е. Денисова, А.С. Мазуренко, Ю.К. Тодорцев, В.А. Дубковский// Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 1. – С. 27- 30.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Исаченко В.П. Теплопередача/ В.П. Исаченко В.А. Осипова, А.С. Сукомел. –М.: Энергия, 1975.– 488 с.
7. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики/ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. - М.: Наука, 1966. - 620 С.
8. Костиков А.О. Влияние теплового состояния грунта на эффективность работы теплонасосной установки с грунтовым теплообменником/ А.О. Костиков, Д. Х. Харлампида// Энергетика: економіка, технології, екологія. –№1.– 2009. –С. 32-40.