

УДК 662.987:697.7

А.Е. Денисова, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Мармусевич, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТОВОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛО- И ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ

А.Є. Денисова, О.В. Мармусевич. Моделювання теплових процесів у ґрунтовій тепловій трубі теплонасосної системи тепло- і хладоснабчання. Приведено схему теплопостачання з використанням ґрунтового теплообмінника. На основі математичного моделювання теплових процесів в ґрунтовому теплообміннику вирішено нестационарну задачу теплообміну. Приведено результати числового моделювання, які дозволяють оцінити тривалість стабілізації фазових переходів у ґрунті навколо теплової труби.

A.E. Denysova, A.V. Marmusevych. Modelling of heat exchange processes in ground thermal pipe of heat pump system of heat- and cold supply. The scheme of heat and cold supply with the use of a ground heat exchanger is given. The non-stationary problem of heat exchange which bases on the mathematical model of heat exchange processes in a ground thermal pipe is solved. The results of numeric modelling allowing to estimate duration of stabilization of phase transitions in the ground around a thermal pipe are presented.

Эффективность работы теплонасосной системы тепло- и хладоснабжения на базе ґрунтового теплообменника (ГТ) зависит от энергетической эффективности процессов, протекающих в ГТ и в слое ґрунта вокруг него. В случае переохлаждения ґрунта, т.е. при изменении его фазового состояния, требуются достоверные сведения о характере изменения поля температур вокруг тепловой трубы во время эксплуатации системы [1].

Принцип действия теплонасосной системы тепло- и хладоснабжения с использованием ГТ (рис.1) заключается в том, что в зависимости от назначения теплоноситель, подаваемый на вход ґрунтового теплоносителя 4, отбирает (либо отдает) тепло от ґрунта. Далее с помощью циркуляционного насоса контура ґрунтового теплообменника 5 поступает в тепловой насос 3, после которого отдает (либо отбирает) тепло теплоносителю контура теплового потребителя [2]. Предусмотрена возможность резервирования за счет использования дополнительного источника теплоснабжения 2, в качестве которого может быть электрический либо газовый водогрейный котел. Нагретый до заданной температуры теплоноситель подается в отопительные приборы 1 различных типов: радиаторы, конверторы, регистры или системы теплых полов. Циркуляция теплоносителя в контуре теплового потребителя поддерживается с помощью насоса 6.

Тепловая ґрунтовая труба (рис.2) имеет форму круглого цилиндра, когда $0 \leq r \leq r_{\text{ГТ}}$, $l_1 \leq z \leq l_2$ (заглубленная часть $l_1 \leq z \leq l_2$), $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, состоящего из двух коаксиально расположенных труб (внешней 1 и внутренней 2), где $r_{\text{ГТ}}$ — наружный радиус внешней трубы 2, φ — угловая координата в плоскости перпендикулярной оси ГТ, z — координата по высоте ГТ. Поток теплоносителя поступает в ґрунтовый теплообменник по входному патрубку 3 и далее по внутренней трубе 2, изготовленной с применением теплоизоляционного материала, опускается на глубину примерно 12 м, после чего разворачивается и соприкасается с наружной стенкой ГТ. Омывая наружную стенку, теплоноситель отбирает тепло у ґрунта, нагревается и подается через теплоизолированный патрубок 4 в ТН и далее к тепловому потребителю.

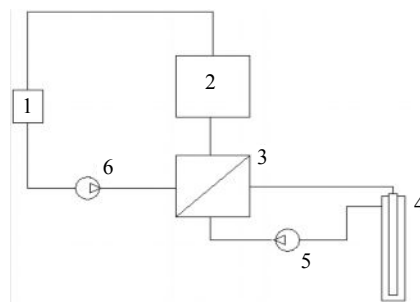


Рис. 1. Схема установки тепло- и хладоснабжения: 1 — отопительные приборы, 2 — дополнительный источник тепла, 3 — тепловой насос, 4 — грунтовый теплообменник, 5 — насос контура циркуляции грунтового теплообменника, 6 — насос контура циркуляции потребителя

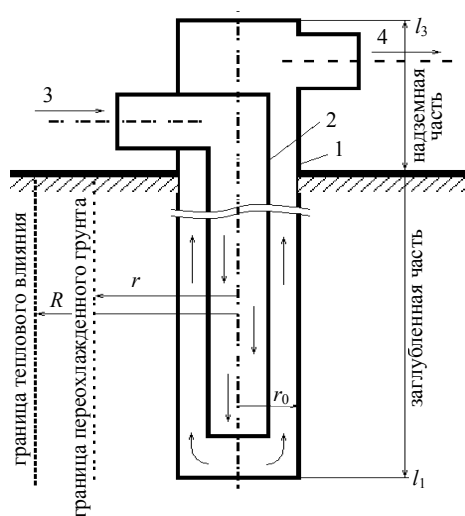


Рис. 2. Тепловая грунтовая труба: 1 — наружная труба, 2 — внутренняя труба, 3 — вход теплоносителя, 4 — выход теплоносителя

Общим для грунтовых тепловых труб является то, что при работе теплонасосной системы теплоснабжения вокруг заглубленной части ГТ возможно образование столба переохлажденного слоя грунта, диаметр которого со временем увеличивается. Скорость изменения диаметра столба грунта вокруг ГТ зависит от величины теплового потока, отводимого грунтовым теплообменником, и потока теплоты, поступающего от охлаждаемого слоя грунта к грунтовой тепловой трубе. В периоды отключения тепловой трубы происходит восстановление естественного поля температур, т.е. повышение температуры грунта вокруг ГТ.

При исследовании теплового режима тепловой трубы возникает задача определения нестационарного температурного поля в окружающем грунте при заданной интенсивности процесса отвода теплоты, зависящего от типа и конструкции грунтовой тепловой трубы.

В качестве исходных данных для решения этой задачи необходимо учитывать климатические характеристики района эксплуатации (температура воздуха, скорость ветра, солнечная радиация), начальную температуру грунта, его теплофизические параметры, конструктивные характеристики ГТ. В этом случае необходимо учитывать, что здесь, протекают два взаимосвязанных процесса: промерзание (оттаивание) грунта при взаимодействии с охлаждающими устройствами и атмосферой и тепломассоперенос в грунтовой тепловой трубе. Таким образом, необходимо рассматривать задачу как совместную для системы “грунт — грунтовая труба — окружающая среда”. Деление задачи на две — внутреннюю и внешнюю — оправдывается тем, что для решения уравнения нестационарной теплопроводности в слое грунта, окружающем

различные по конструкции тепловые трубы, применяются одни и те же методы, в то время как внутренний тепломассоперенос существенно зависит от типа и конструкции грунтовой трубки.

На первом этапе (ГТ работает в режиме отвода тепла от грунта) рассматривается вопрос о замораживании и последующем охлаждении грунта вокруг вертикально заглубленной части тепловой трубы. Задача Стефана заключается в определении температуры $t=t(r, z, \varphi, \tau)$ и поверхности фазового фронта $z = z(r, \varphi, \tau)$ в коаксиальной области (см. рисунок 2), окружающей трубу в грунте, где τ — время наблюдения. Эту задачу будем решать в предположении радиальной цилиндрической симметрии, когда исходные данные и решение не зависят от φ .

Математически задача формулируется при помощи двух уравнений теплопроводности для талой и мерзлой зон грунта, с учетом граничных условий Стефана на подвижной границе раздела фаз и граничных условий II—III рода на ограничивающих поверхностях. Для неоднородного грунта на поверхностях раздела слоев должны выполняться граничные условия IV рода. Потоками тепла, проходящими через нижнее основание моделируемой области, которое находится на весьма большой глубине (10 ... 15 м), а также через внешнюю боковую цилиндрическую поверхность достаточно большого радиуса (10 ... 15 м), можно пренебречь.

Для одномерной задачи за начальное распределение можно взять, например, решение стационарной задачи для талого грунта с соответствующими граничными условиями. Помимо указанного способа определения начального распределения температур можно использовать данные натурального эксперимента, что является наиболее предпочтительным.

Задача нестационарного теплообмена тепловой трубы с грунтом в плоской осесимметричной постановке формулируется следующим образом (считается, что фазовые переходы влаги в порах грунта в процессе теплообмена отсутствуют, что может иметь место либо при отрицательной температуре грунта, либо при отсутствии в нем влаги) [4]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} \right), \quad r_0 \leq r \leq \infty,$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha (t|_{r=r_0} - t_B),$$

$$t|_{\tau=0} = t_M.$$

Решение этой задачи получено при помощи преобразований Лапласа [3].

Получим простые рекуррентные соотношения для радиусов промерзания грунта вокруг тепловой трубы.

Задача Стефана решается при следующих предположениях [4]:

- рассматривается одномерная задача Стефана в плоскости, перпендикулярной оси трубы;
- грунт является однородным и изотропным;
- переход воды в лед происходит при постоянной температуре $t_{\phi}=0$ °С;
- неустановившаяся теплопроводность рассматривается как последовательная смена стационарных состояний;
- тепловая труба является безынерционным устройством;
- радиусы переохлаждения и влияния пропорциональны, т.е. $R = a \cdot r$, где R — радиус влияния; r — радиус переохлажденного грунта; a — постоянный коэффициент, выбираемый равным 4 ... 5,5);
- изменения влажности при переохлаждении грунта не происходит;
- теплоемкость и теплопроводность в мерзлой и талой зонах грунта остаются постоянными при изменении температуры;
- температура воздуха является кусочно-непрерывной функцией;
- $r_{\text{кон}} = r_{\text{нач}} + \beta \sqrt{\tau}$, ($\beta = \text{const}$), т.е. $dr/d\tau = (r_{\text{кон}} - r_{\text{нач}})/2\tau$, где $r_{\text{нач}}$, $r_{\text{кон}}$ — начальное и конечное значения радиуса зоны переохлажденного грунта, соответственно;
- в пассивный период тепловой поток на стенке тепловой трубы равен нулю.

С учетом сделанных предположений запишем уравнение теплопроводности и граничные условия для мерзлой и талой зон в грунте.

Для талой зоны до начала замораживания:

$$\frac{d^2 t_{\Gamma}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt_{\Gamma}}{dr} = 0, \quad r > r_0, \tau < \tau_3,$$

$$\lambda_{\Gamma} \left. \frac{dt_{\Gamma}}{dr} \right|_{r=r_0} = \alpha_{\text{эф}} (t_{\Gamma}|_{r=r_0} - t_B),$$

$$t_{\Gamma}|_{r=R_0} = t_{\Gamma},$$

где r_0 — радиус тепловой трубы (начальный радиус зоны переохлажденного грунта);
 R_0 — начальный радиус влияния;
 t_{Γ} — температура грунта на значительном удалении от охлаждающего устройства;
 τ_3 — момент начала замораживания грунта.

Тогда решение в рекуррентной форме [5] будет иметь вид

$$\tau_i = \frac{1}{4\lambda_m |t_B^i|} \left[Q_{\Phi} + \frac{(a^2 - 1)C_{\Gamma} t_{\Gamma}}{2 \ln a} \right] \left[(r_i^2 - r_{i-1}^2) \left(\frac{2\lambda_m}{\lambda_i} - 1 \right) + 2r_i^2 \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} \right],$$

где $\lambda_i = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{эф}} r_0} + \frac{1}{\lambda_m} \ln \frac{r_{i-1}}{r_0} \right)^{-1}$.

Представленная методика математического моделирования позволяет установить длительность периода термической стабилизации слоя грунта вокруг грунтовой тепловой трубы, при котором зона переохлажденного грунта вокруг ГТ практически не увеличивается.

Результаты численного моделирования, полученные на основе математической модели тепловых процессов в системе “грунт — грунтовая труба — окружающая среда” (рис. 3), выявили характер изменения радиуса переохлажденного грунта вокруг ГТ в течение эксплуатации теплонасосной установки теплоснабжения. Из графика видно, что в начальный период эксплуатации ГТ идет интенсивное переохлаждение грунта (зона интенсивного охлаждения грунта вокруг ГТ), затем период термической стабилизации, при котором скорость увеличения радиуса кругового слоя переохлажденного грунта вокруг ГТ практически не изменяется.

Для практических расчетов изменения радиуса слоя переохлажденного грунта вокруг ГТ в течение эксплуатации установки можно рекомендовать формулу

$$r = -4 \cdot 10^{-13} \cdot \tau^3 + 2 \cdot 10^{-19} \tau^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot \tau + 0,0247,$$

где τ — время эксплуатации системы, ч.

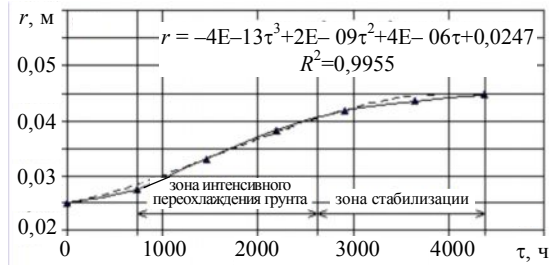


Рис. 3. Изменения радиуса переохлажденного грунта во времени

При использовании теплонасосных систем тепло- и хладоснабжения на основе ГТ переохлаждение грунта является нежелательным, поскольку это может привести к нарушению вегетации растительности. Кроме того, многократные периодические изменения агрегатного состояния грунтовой влаги могут негативно повлиять на прочность фундаментов близлежащих зданий. Разработанная модель процесса теплообмена позволяет исследовать эффективность рабо-

ты системы при изменении климатических условий, режимов работы и конструкции ГТ с целью оптимизации режимов работы.

Литература

1. Денисова А.Е. Математическое моделирование процессов теплообмена в элементах комплексной альтернативной системы теплоснабжения // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып. 3.(9) — С. 99 — 104.
2. Денисова А.Є. Інтегровані системи альтернативного теплопостачання для енергозберігаючих технологій: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Одеса, 2003. — 36 с.
3. Carslow H.S. Some two-dimensional problems in condition of heat with circular symmetry / Carslow H.S., Jaeger J.C. // Proc. London Math. Soc. Ser. 2. — 1940. —vol. 46. — P. 361 — 388.
4. Экспериментальное и теоретическое исследование замораживания грунта с помощью тепловых труб / Вааз С.Л., Васильев Л.Л., Гаркович Л.П., Гапеев С.И. // Тепломассообмен. VI ИТМО АН БССР. — Минск: Наука и техника. —1980, Т. 4, ч. 2. — С. 105 — 110.
5. Васильев Л.Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств / Васильев Л.Л., Вааз С.Л. Минск: Наука и техника, 1986. —192 с.

Поступила в редакцию 25 июля 2005 г.
