

## ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.577.2:536.24

*И. Н. Булдакова*, старший преподаватель  
*Е. В. Корепанов*, кандидат технических наук, доцент  
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### НАГРЕВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБЕ U-ОБРАЗНОГО ГРУНТОВОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

*Решением одномерного дифференциального уравнения энергии получено аналитическое решение для расчета температуры теплоносителя в трубе U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки при постоянной и линейной температуре поверхности трубы. Полученные уравнения используются совместно с решением задачи теплопроводности грунта для расчета нагрева теплоносителя. Приводятся результаты анализа влияния способа задания закона изменения температуры поверхности трубы коллектора на выбор размеров конечно-элементной области.*

**Ключевые слова:** геотермальный тепловой насос, вертикальный грунтовый коллектор, нагрев теплоносителя.

Нагрев теплоносителя в канале вертикального грунтового коллектора осуществляется за счет подвода теплоты от окружающего грунта. Из-за сложности и многофакторности расчетной области задача решается численными методами [1–6]. Температура теплоносителя вычисляется либо в результате решения сопряженной задачи конвективного теплообмена в грунтовом коллекторе, включающей систему уравнений теплопроводности грунта, а также уравнения гидродинамики и энергии потока теплоносителя в коллекторе [7], либо решением задачи теплопроводности грунта с применением уравнения теплового баланса для расчета конечной температуры теплоносителя [8–10]. Температура грунта зависит от температуры теплоносителя, поэтому используется итерационная процедура при исследовании как стационарного, так и нестационарного режима теплосъема.

Наиболее точное значение температуры, получаемое в результате решения сопряженной задачи в среде ANSYS [11], из-за большого количества конечных элементов может быть использовано для расчета отдельных вариантов, т. к. время счета достигает нескольких часов. Расчет режима теплосъема от грунта в течение отопительного периода и восстановления температурного потенциала в летний период от теплоты системы кондиционирования занимает сотни часов. Поэтому для вариантных и конструктивных расчетов целесообразно решать связную задачу: теплопроводность грунта – нагрев теплоносителя.

Для повышения точности расчета нагрева грунта вместо применения балансного уравнения предлагается использовать аналитическое решение дифференциального уравнения энергии для потока теплоносителя в трубе коллектора в одномерной постановке.

Задача нагрева теплоносителя может рассматриваться как стационарная, т. к. время течения теплоносителя на 1–2 порядка меньше временного шага, используемого при расчете температурного поля

в грунте. Для стационарной задачи уравнение энергии потока жидкости, движущейся со скоростью  $u$  в трубе длиной  $l$ :

$$f\rho c \frac{dt}{dz} = \alpha\chi [t_F(z) - t]$$

или

$$\frac{dt}{dz} + mt = mt_F(z), \quad (1)$$

где  $m = \alpha\chi/(f\rho c u)$ ;  $t_F(z)$  – температура поверхности трубы;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и теплоемкость жидкости;  $f$  – площадь живого сечения потока;  $\chi$  – смоченный периметр канала;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности трубы.

Решение уравнения (1) имеет вид [12]:

$$t = e^{-mz} \left( c + m \int_0^z t_F(z) e^{mz} dz \right). \quad (2)$$

При использовании численных методов расчета температуры грунта температура поверхности трубы может быть представлена в виде линейной зависимости (линейная аппроксимация температуры поверхности между узлами сеточной области):

$$t_F(z) = a + bz = t'_F + (t''_F - t'_F)z/l, \quad (3)$$

где  $t'_F$  и  $t''_F$  – температура поверхности в начале и в конце участка канала;  $l$  – длина участка канала.

Подставляя (3) в уравнение (2) и интегрируя, получаем

$$t = ce^{-mz} + me^{-mz} \left[ \frac{t'_F}{m} e^{mz} + \frac{(t''_F - t'_F)}{ml} \left( z - \frac{1}{m} \right) e^{mz} \right]$$

или после сокращения

$$t = t'_F + \frac{(t''_F - t'_F)}{l} \left( z - \frac{1}{m} \right) + ce^{-mz}.$$

Постоянную  $c$  находим, используя начальное условие  $t(z=0) = t_0$ . В результате, после несложных преобразований, получаем температуру жидкости в канале длиной  $z = l$ :

$$t = t_0 + (t_F'' - t_F') - \left[ t_0 - t_F' + (t_F'' - t_F') \frac{1}{ml} \right] (1 - e^{-ml}). \quad (4)$$

Для трубы круглого сечения  $\chi = \pi d$  и  $f = \pi d/4$ , откуда  $m = 4\alpha/(c\rho ud)$ . С другой стороны,  $\rho ud = G$  – массовый расход теплоносителя. Площадь поверхности участка трубы длиной  $l$  равна  $F = \chi l$ . С учетом этого параметр  $m = 4\alpha/W$ , где  $W = cG$  – условный (водяной) эквивалент. В этом обозначении параметр  $m$  становится аналогом величины  $NTU = kF/W$  – числа единиц переноса теплоты теплообменника. Окончательно, с учетом этой замены, конечная температура теплоносителя в канале определяется выражением:

$$t = t_0 + (t_F'' - t_F') - \left[ t_0 - t_F' + (t_F'' - t_F') \frac{W}{\alpha F} \right] \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha F}{W}\right) \right].$$

При расчете грунтового коллектора толщину стенки трубы (обычно 2...2,4 мм) можно учесть введением приведенного коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{пр} = 1 / \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} \right),$$

где  $\delta_T$  и  $\lambda_T$  – толщина стенки и теплопроводность трубы.

В этом случае температуру  $t_F$  следует принимать на внешней поверхности трубы, а площадь  $F$  рассчитывать по наружному диаметру трубы.

Помимо линейного изменения температуры поверхности в канале для расчета нагрева теплоносителя используется постоянная температура поверхности трубы [13], определяемая как среднеарифметическая в соседних сечениях. В этом случае температура теплоносителя в конце участка:

$$t = t_0 + (t_F - t_0') \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha F}{W}\right) \right].$$

Результаты анализа сходимости решения и влияния количества сечений по высоте скважины при различных значениях расхода и начальной температуре теплоносителя приведены на рис. 1. Расчеты выполнялись для скважины глубиной 200 м. В качестве теплоносителя применялся рассол. Сходимость оценивалась по суммарной абсолютной погрешности  $\sum (t_i^S - t_i^{S+1}) < \epsilon$ . Суммировалось отличие значения температуры теплоносителя в узлах сеточной области в каждом сечении как на опускном, так и на подъемном участке трубы коллектора.

При малых расходах и высокой температуре теплоносителя отличие использования линейного закона изменения теплоносителя от варианта с постоянной

температурой при небольшом числе сечений не превышает 20 %. При увеличении числа сечений погрешность расчета быстро уменьшается. Но т. к. температура грунта в средней полосе России в зоне нулевого геотермального градиента равна 6,5–10 °С [14, 15], то для уменьшения количества скважин необходимо повышать их теплопроизводительность увеличением разности температуры грунта и теплоносителя. Это можно сделать за счет снижения начальной температуры теплоносителя. В этом случае погрешность счета при малом количестве сечений по высоте (до 20 сечений) может превышать 100 % (вариант  $G = 0,3$  кг/с,  $t_0 = -5$  °С). Для этого варианта расчета отличие применения линейной и постоянной температуры поверхности значительно.

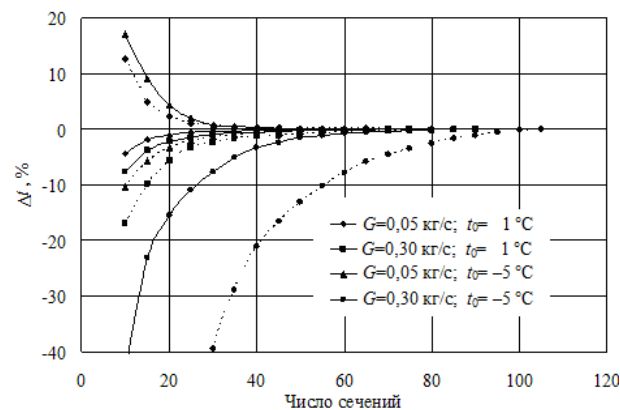


Рис. 1. Сходимость расчета температуры теплоносителя в скважине глубиной 200 м: сплошная – линейная; пунктирная – постоянная

На рис. 2 приводится сравнение необходимого для заданной точности решения задачи при линейной и постоянной температуре поверхности трубы. Отличие в необходимом количестве сечений составляет значения от 14 до 31. Поскольку от количества сечений зависит количество узлов сеточной области, то получается существенный выигрыш по времени счета с сохранением заданной точности решения.

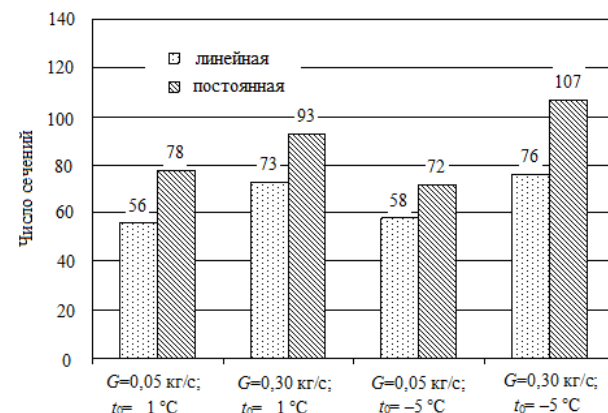


Рис. 2. Число сечений по глубине скважины глубиной 200 м

Количество итераций, необходимых для достижения заданной точности решения при различном законе изменения температуры поверхности трубы

(рис. 3), практически не отличаются (не более 10 итераций).

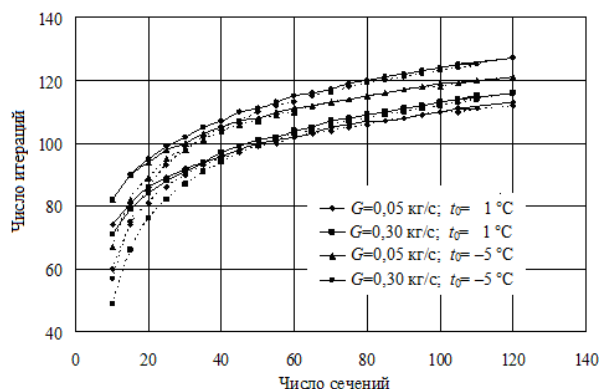


Рис. 3. Количество итераций при расчете температуры теплоносителя в скважине глубиной 200 м: сплошная – линейная; пунктирная – постоянная

Таким образом, определяющим фактором уменьшения времени решения задачи (особенно нестационарной) нагрева теплоносителя  $U$ -образного грунтового коллектора является уменьшение количества узлов сеточной области за счет уменьшения сечений по высоте скважины. Это особенно важно для длительных периодов времени – время установления режима скважины составляет период от 3 до 5 лет.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли : монография. – М. : Граница, 2006. – 176 с.
2. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Определение теплопроизводительности вертикального грунтового коллектора теплонасосной установки в климатических условиях Удмуртской Республики // Теоретические основы теплога-

зоснабжения и вентиляции : матер. 3-й Междунар. науч.-техн. конф., 21–23 ноября 2009, МГСУ. – М. : МГСУ, 2009. – С. 107–110.

3. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Моделирование нестационарного теплообмена грунта с  $U$ -образным коллектором теплонасосной установки. // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 456–462.

4. Кротов В. М. Исследование тепловых характеристик вертикальных грунтовых теплообменников систем теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 8. – С. 61–65.

5. Кротов В. М. Совершенствование расчета вертикальных грунтовых теплообменников систем теплоснабжения. // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2009. – Вып. 15 (34). – С. 129–133.

6. Штым А. С., Маркелова И. А. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2011. – Вып. 23 (42). – С. 126–133.

7. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Указ. соч. – С. 456–462.

8. Кротов В. М. Исследование тепловых характеристик вертикальных грунтовых теплообменников систем теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 8. – С. 61–65.

9. Кротов В. М. Совершенствование расчета вертикальных грунтовых теплообменников систем теплоснабжения. // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2009. – Вып. 15 (34). – С. 129–133.

10. Штым А. С., Маркелова И. А. Указ. соч. – С. 126–133.

11. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Указ. соч. – С. 456–462.

12. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М. : Наука, 1976. – 576 с.

13. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Указ. соч. – С. 107–110.

14. Там же.

15. Семенов Б. А., Соловьёв В. А. Проблемы и особенности использования грунтовых тепловых насосов для автономного теплоснабжения объектов в центральных регионах России // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 2. – № 1. – С. 167–172.

\*\*\*

I. N. Buldakova, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E. V. Korepanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Heating the thermal medium in tube of $U$ -type soil collector of heat-pump system

*Solution of one dimensional differential equation of energy allowed obtaining the analytic calculation result for the temperature of thermal medium in the tube of  $U$ -type soil collector of heat-pump unit at constant and linear temperature of the pipe surface. The obtained equation are applied along with solving the problem of soil thermal conductivity to calculate the thermal medium heating. Results are given for analyzing the influence of assigning the law of collector pipe surface temperature variation on the choice of dimensions of finite-element area.*

**Keywords:** geothermal heat pump, vertical soil collector, thermal medium heating.

Получено: 02.10.14