

## Выбор граничных условий для моделирования температурного поля грунта

Н.Н.Руденко, И.В. Бондарев

В настоящее время массово выпускаются тепловые насосы (ТН) для обогрева помещений. Ведутся разработки по повышению эффективности ТН [1]. В качестве источника низкопотенциального тепла многими фирмами рекомендуется использовать грунт [2]. Глубина промерзания грунта в южных регионах не достигает даже одного метра, т.е. поверхностный слой имеет положительные температуры весь отопительный период года.

В сравнении с воздухом грунт имеет явные преимущества. Температура грунта на небольшой глубине имеет положительные температуры, в отличие от низких температур воздуха, которые могут достигать  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. Несомненным достоинством является и более высокая теплоемкость и плотность грунта, в одинаковом объеме в грунте содержится теплоты на несколько порядков больше, нежели в воздухе.

Однако, оценка эффективности грунтовых теплообменников невозможна без моделирования изменения температур в поверхностных слоях. Изучение этих вопросов уделялось при проектировании подземных трубопроводов и теплотрасс. Результаты этих исследований послужили основой для разработки нормативов, в частности для крупных населенных пунктов в [3] представлены изменение температуры грунта на глубине 1,6 м.

Однако, коллекторы тепловых насосов закладываются на разных глубинах. Вопросам моделирования температур в поверхностных слоях посвящено несколько работ [4,5]. Наибольший интерес представляет работа [6], в которой представлена зависимость, позволяющая прогнозировать температуру грунта в течение года:

$$T_g(X_s, t) = \bar{T}_g - A_g \cdot \exp\left(-X_s \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365 \cdot \alpha} \left[ t - t_0 - \frac{X_s}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}} \right]\right) \quad (1)$$

Представленная зависимость использует размерности традиционные для Северной Америки, что затрудняет ее применение. Кидрук М.И. выполнил ее преобразование, для представления исходных данных в системе СИ [7].

$$T_{\bar{a}\delta}(x) = T_{\bar{a}\delta} - A_s \cdot \exp\left(-3.16 \cdot 10^{-4} x \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \left[t - t_0 - 1.834 \cdot 10^{-2} \cdot x \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}}\right]\right) + x \cdot \frac{\alpha}{100}$$

*Даже предварительный анализ полученных зависимостей может* выявить ряд проблем по ее использованию. Остается открытым вопрос о выборе исходных данных, в частности непонятным является принятие годовой амплитуды колебания температуры  $A_s$ . Очевидным, что данное значение относится к колебаниям температуры поверхности почвы. Определение этого значение связано с некоторыми проблемами, поэтому некоторые авторы [7] приравнивают температуру поверхности к температуре окружающего воздуха. Если принять максимальные и минимальные значения температуры наружного воздуха, то результаты расчета становятся неадекватными. В частности в работе Кидрука М.И. представлены расчеты для г. Киев. Минимальной температурой принято значение  $-19$  оС, а максимальной  $+33$  оС. В этом случае результаты вычислений дают зону промерзания более трех метров, что не соответствует многолетним наблюдениям в этой местности.

По всей видимости, в данном случае нельзя выполнять такие упрощения. Определить эту величину возможно только при рассмотрении поступления теплоты, как от воздуха, так и от солнечной радиации, т.е. необходимо рассмотреть граничные условия третьего рода.

Температура поверхности почвы может быть определена по следующей зависимости [8]:

$$\tau_{1,z+1} = \frac{\alpha \cdot t_g + \frac{\lambda \cdot \tau_{2,z}}{\Delta x} + Q_{c.p.}}{\alpha + \frac{\lambda}{\Delta x}}$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от грунта к воздуху,  
 $\Delta x$  – толщина поверхностного слоя,  
 $\tau_{2,z}$  – температура грунта ниже поверхностного слоя в предыдущий расчётный интервал времени.

Однако, решение этого уравнения усложняется необходимостью учета динамики как теплового потока от солнечной радиации  $Q_{с.р.}$ , так и годовому изменению температуры воздуха  $t_{в.}$ .

Температура воздуха в течение года изменяется в широких пределах, причем стояние экстремальных значений температур носит непродолжительный характер, поэтому аппроксимация этой зависимости в виде гармонической функции неизбежно приведет к значительным искажениям действительности. Для подтверждения этого утверждения произведем анализ стояния температур в г. Ростове-на-Дону. В соответствии климатологией [9] стояние температур может быть выражено в виде следующего графика, изображенного на рис. 1.

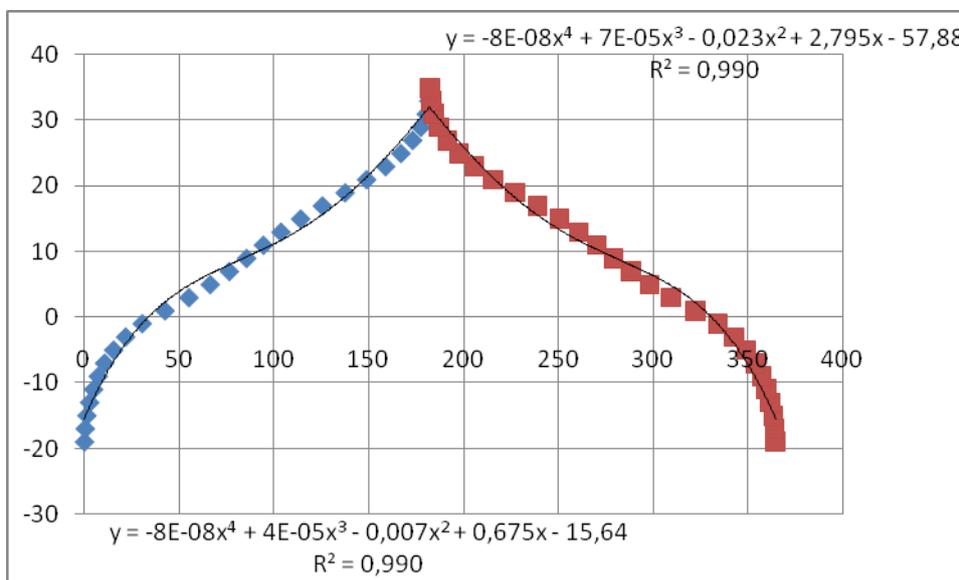


Рис. 1. Изменение температур в Ростове-на-Дону за год.

Стояние температур хорошо аппроксимируется полиномом четвертого порядка.

Поступление солнечной радиации на горизонтальную поверхность достаточно хорошо изучено и может быть определено для любых широт. В

СНиПе «Строительная климатология» представлены данные поступления теплоты для всех месяцев года. Несложно сделать преобразования и с учетом допущения, что средние значения соответствуют середине месяца, определить тепловой поток на поверхность грунта. На рис. 2 представлена кривая солнечной радиации по данным [9] и аппроксимация в виде гармонической функции, которая имеет минимальные отклонения от экспериментальных значений.

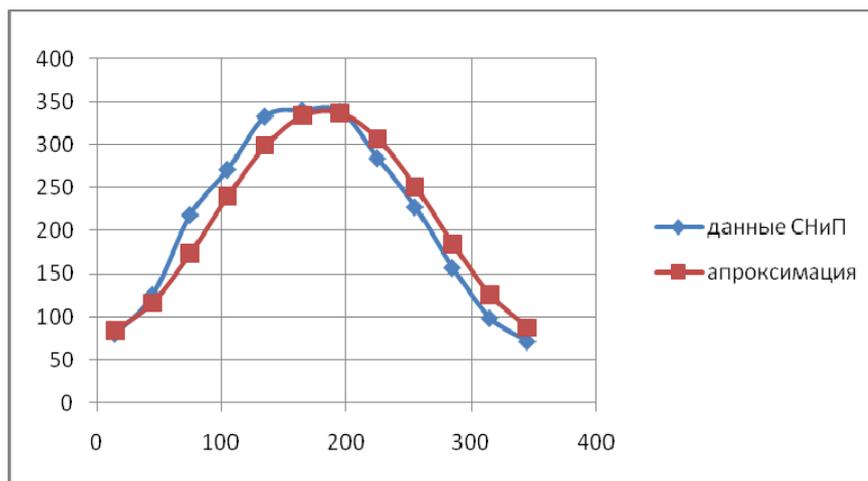


Рис. 2. Солнечная радиация на горизонтальную поверхность в г. Ростове н/Д

Аппроксимация выполнена функцией  $q=210-130\cos(2\pi D/365)$ , Вт/м<sup>2</sup>, где D –порядковый день в году.

Полученные зависимости, характеризующие теплообмен на поверхности грунта, позволяют разработать математическую модель распределения температур адекватную многолетним наблюдениям.

#### Литература:

1. Мазурова О.К., Чебанова Т.О. К оценке эффективности переохлаждения для ряда хладагентов в теплонасосном цикле [Электронный ресурс] // Интернет-журнал "Науковедение", № 3, 2013, <http://naukovedenie.ru/PDF/52trgsu313.pdf> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Kavanaugh P.K. and Rafferty K. Ground-source Heat Pumps — Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings //

Publishing of American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA. — 1997. — 223 p.

3. Справочник по климату СССР (Л. : Гидрометеоиздат. Вып. 1–34).
4. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: Монография. Издательский дом «Граница». – М. : Красная звезда, 2006. 263 с.
5. Федянин В.Я., Карпов М.К. Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения. ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК, № 4, 2006, стр. 98-103.
6. RETScreen® International. Ground-source Heat Pump Project Analysis: Chapter // RETScreen® Engineering & Cases Textbook. – Ministry of Natural Sources of Canada, 2005. – 70 p.
7. Кидрук М.И. Моделирование работы грунтового коллектора теплового насоса. [Электронный ресурс] <http://progress21.com.ua/ru/articles/groundcollector> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
8. Руденко Н.Н., Фурсова И.Н. Моделирование температурного поля в грунте. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, № 2 (часть 1). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1697> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. СНиП 23-01-99 Строительная климатология.
10. Фурсова И.Н., Терезников Ю.А. Исследование влияния температуры внутреннего воздуха на распределение температуры поверхности тёплого пола [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, [№ 2 \(часть 2\)](http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1700). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1700> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.