

Математическое и имитационное моделирование социально-экономических процессов в строительном комплексе

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ТРУБ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В РАЗЛИЧНЫХ ГРУНТАХ

А. С. Кладиева, Г. В. Ракин

*Астраханский государственный университет,
г. Астрахань (Россия)*

При строительстве различных сооружений большое внимание уделяется вопросу их отопления. Крупные хозяйственные постройки требуют значительных энергозатрат, поэтому в условиях высокой стоимости электроэнергии и горючего топлива необходимы альтернативные способы обогрева помещений. Одним из таких способов является строительство тепловых насосов, передающих тепло, накопленное в глубинных слоях почвы, потребителю.

Тепловые насосы позволяют существенно уменьшить объемы электропотребления системой отопления помещения. Самыми экономически выгодными и наиболее дешевыми в плане монтажа являются геотермальные тепловые насосы типа «грунт-вода», работающие по принципу нагревания воды в коллекторах за счет постоянной температуры грунта, которая в течение всего года поддерживается на постоянном уровне за счет поглощения Земной поверхностью солнечного излучения [1]. Для эффективной работы теплового насоса необходимо определить оптимальную глубину грунта, на которой будет поддерживаться постоянная температура, поскольку основная часть денежных средств, связанных с установкой теплового насоса, затрачивается на монтаж коллекторных труб на глубину порядка 7–10 метров.

При монтаже систем отопления инженеры компаний, занимающихся установкой тепловых насосов, выбирают глубину слоя, руководствуясь своим опытом и данными, полученными из технической литературы, что, несомненно, может повлечь за собой необоснованные затраты. Их можно минимизировать, если знать наименьшую глубину грунта, на которой температура оптимальна в течение всего года для данного региона.

С помощью предлагаемой компьютерной программы *SoilTemp*, которая моделирует термодинамические процессы, происходящие в различных слоях почвогрунта на заданной широте местности, можно показать, что в

Астраханском регионе монтировать коллекторные трубы можно на глубину, меньшую пяти метров. Это приведет к ощутимой экономии времени и материалов, и как следствие, финансовых средств.

Данная программа основана на математической модели, учитывающей кинематику движения Земли [2] и представленной системой дифференциальных уравнений теплопроводности, адекватность которой была проверена ранее, путем сравнения теоретических и экспериментальных данных. Рассмотрим основные положения модели.

Поверхность сухой почвы отдает энергию в окружающее пространство в основном благодаря тепловому излучению, которое рассматривается как излучение абсолютно серого тела с коэффициентом полного излучения ε . Энергетическая светимость такого тела в соответствии с законом Стефана-Больцмана выражается через температуру q_0 поверхностного слоя почвы:

$$r = \varepsilon \sigma T_0^4 (1 + q_0 / T_0)^4, \quad (1)$$

где σ – постоянная закона Стефана – Больцмана; T_0 – абсолютная температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении.

Решение системы N уравнений баланса энергии горизонтальных слоев почвы имеет вид [3]:

$$\frac{dq_i}{dt} = \kappa_{i+1,i}(q_{i+1} - q_i) + \kappa_{i-1,i}(q_{i-1} - q_i) + \delta_{i,0}[a_0 E - r_0(1 + q_0 / T_0)^4 - \kappa_{i-1,i}(q_{i-1} - q_i)] \quad (2)$$

где $0 \leq i \leq (N - 1)$. Коэффициенты поглощаемой и испускаемой мощностей излучения определяются соотношениями:

$$a_0 = \frac{\alpha Q_0}{ch_0} \quad \text{и} \quad r_0 = \frac{\varepsilon \sigma T_0^4}{ch_0}. \quad (3)$$

c – удельная объемная теплоемкость. Коэффициенты теплообмена κ зависят от толщины слоев и асимметричны относительно перестановки индексов. Температуру q_N нижней поверхности последнего слоя полагаем постоянной. Иначе, изменениями температуры ниже уровня, определяемого суммарной толщиной слоев, можно пренебречь.

Система уравнений первого порядка (2) при заданных начальных условиях численно решается в среде MatLab. Начальные значения температуры слоев почвы определяются из условия цикличности решений

$$\sum_{i=1}^N |q_i(0) - q_i(\tau_1)| \leq 10^{-3}, \quad (4)$$

то есть температуры $q_i(0)$ слоев 1 января 00 ч 00 мин равны их значениям, полученным для 24 ч 00 мин 31 декабря. Решение уравнений (2) дает регулярную периодическую составляющую годового хода температуры почвы на различных глубинах.

Результатом работы программы *SoilTemp* является визуализация процессов изменения температуры почвы в течение заданного промежутка времени. На рис. 1 представлены графики зависимости среднесуточной температуры слоев от времени в течение года.

Из рис. 1 видно, что на широте Астрахани (46°) среднесуточная температура верхнего слоя изменяется от -20°C зимой до 40°C летом, при этом максимум приходится 190 сутки, т.е. на 10 июля. Температура нижнего слоя, находящегося на глубине 7 метров, в течение всего года незначительно отклоняется от 13°C , максимум же приходится на 320 сутки, т.е. на 16 ноября. Это связано с тем, что почва обладает большой тепловой инерцией, и ниже глубины 12–15 м ее температура остается неизменной.

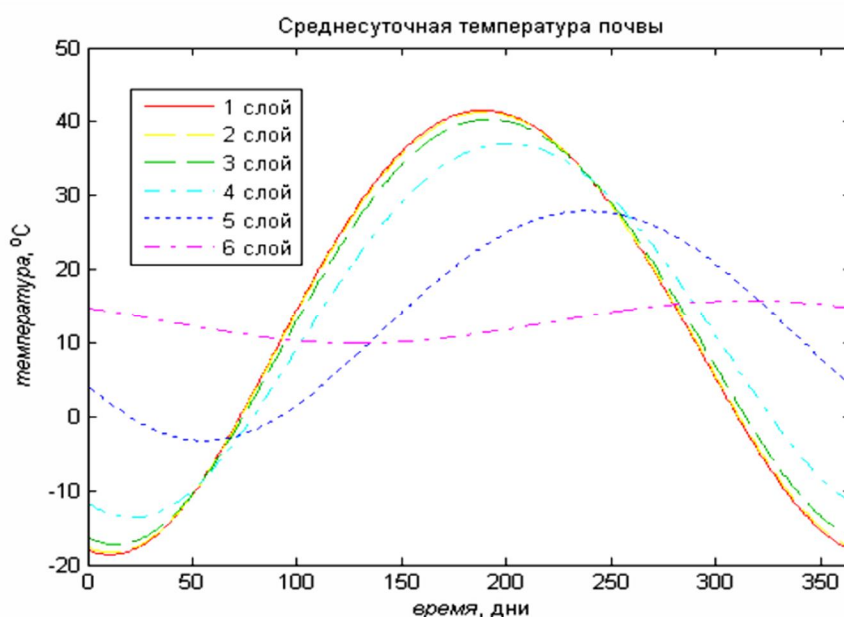


Рис. 1. Зависимость среднесуточной температуры слоев от времени в течение года

Программа *SoilTemp* позволяет также найти ожидаемый в рамках рассматриваемой математической модели температурный профиль почвы для любого момента времени в течение года.

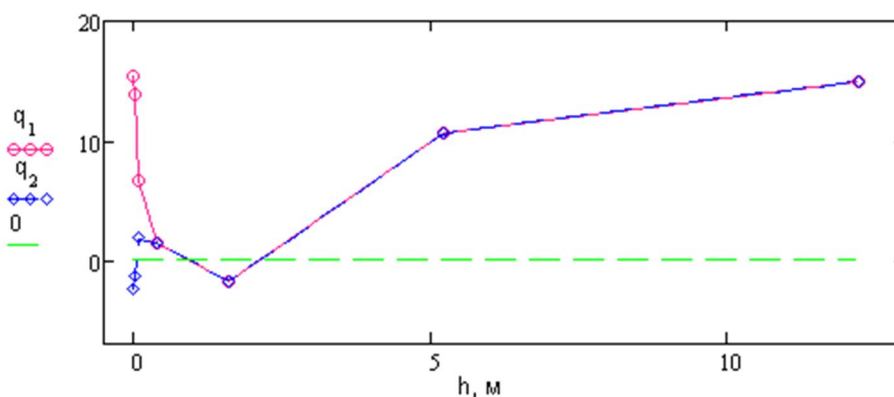


Рис. 2. Расчетный температурный профиль почвы на 25 марта: сплошная линия соответствует 15 ч 30 мин, а штриховая – 5 ч 00 мин

В качестве примера на рис. 2 приведен вычисленный на 25 марта температурный профиль почвы, то есть зависимость температуры от глубины. Сплошная линия показывает распределение температуры по глубине в 15 ч 30 мин, а штриховая – в 5 ч 00 мин. Видно, что на широте 46° в конце марта в преддверие часы на почве ожидаются заморозки, хотя днем она может прогреваться на поверхности до 16°C . Ниже нулевой отметки температура почвы остается на глубине от 1 до 2 метров, но на глубине около 5 метров температура почвы имеет значение порядка 11°C . Этой температуры достаточно для обогрева хозяйственных помещений, подобных продовольственным складам.

Таким образом, с помощью представленной программы можно определять оптимальную глубину залегания труб, необходимую для эффективной работы теплового насоса.

Литература

1. Васильев, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли : монография / Г. П. Васильев. – М. : Красная звезда, 2006. – 220 с.
2. Кладиева, А. С. Расчеты в среде MATLAB широтно-временного распределения солнечной энергии на поверхности Земли / А. С. Кладиева, А. У. Джалмухамбетов // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2009. – С. 146–155.
3. Джалмухамбетов, А. У. Моделирование температурной динамики сухих почв с учетом астрофизических факторов / А. У. Джалмухамбетов, А. С. Кладиева, А. В. Федотова // Вопросы управления в социально-экономических процессах и информационной среде: материалы Всероссийской научной конференции (г. Астрахань, 12 мая 2011 г.). – Астрахань : Издатель Сорокин Роман Васильевич, 2011. – С. 145–151.