

4. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности.) / В. Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

5. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание, 2013. – 584 с.

УДК 624.131.436

Температурный режим грунтов с заложенными коллекторами тепловых насосов

Костюкевич И. Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В результате физико-математического моделирования годового температурного воздействия наружного воздуха для г. Минска получен график температурного режима массива грунта в течение года.

Исследование нестационарного теплового взаимодействия грунтовых коллекторов тепловых насосов с массивом грунта предполагает разработку физико-математических моделей конструктива исследуемого объекта, описание с помощью дифференциальных уравнений процессов переноса теплоты и формулировку краевых условий.

Перенос теплоты в исследуемом грунтовом массиве может быть представлен уравнением

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}[\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)] + q_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$; C – теплоемкость грунта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T – температура грунта, К ; λ – коэффициент теплопроводности грунта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Применительно к рассматриваемой задаче источник $q_v = 0$.

В уравнении не учтены процессы фильтрации грунтовых вод и их влияние на теплофизические характеристики грунтового массива. Математическое описание фильтрации грунтовых вод должно учитывать связь этого процесса с режимом погоды и временами года. Это практически неразрешимая задача и в настоящее время многими исследователями учитывается только фрагментарно, путем фиксированного для интервала времени значения теплофизических коэффициентов, включая учет влияния процессов промерзания и протаивания.

Уравнение энергии для несжимаемого потока жидкости в трубопроводе:

$$\rho AC_p \frac{\partial T_2}{\partial t} + \rho AC_p u \nabla T_2 = \nabla A \lambda \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{2} |u|^3 + Q + Q_{\text{стен}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; A – площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 ; C_p , λ – соответственно теплоемкость холодоносителя (теплоносителя) при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, и коэффициент теплопроводности материала трубы (в частном случае конструкция трубы может быть многослойной, т. е. $\lambda = f(r)$), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; T_2 – температура холодоносителя (теплоносителя), К .

Выше таким же идентификатором обозначена температура грунта; u – функция, определяющая поле скоростей в поперечном сечении трубопровода; Q – функция внутреннего источника теплоты, $\text{Вт}/\text{м}$; $Q_{\text{стен}}$ – функция, определяющая теплообмен холодоносителя (теплоносителя) через стенку с окружающей средой (грунтом), $\text{Вт}/\text{м}$; $Q_{\text{стен}}$ – тепловой поток, определяемый по условиям взаимодействия грунтового массива и трубопроводов коллектора, в нашей задаче может быть задан граничными условиями 4-го рода.

На естественное формирование температурного поля грунтового массива основное влияние оказывают конвективный тепловой поток между поверхностью Земли и атмосферным воздухом, а также радиационный баланс (алгебраическая сумма излучения Солнца и излучения земной поверхности в мировое пространство, осложненное облачностью и другими атмосферными процессами). Таким образом, задача определения начального распределения температуры в грунте представляется как некорректная. Однако, разработав физико-математическую модель процессов переноса в грунтовой массиве и взаимодействия его поверхности с окружающей средой и мировым пространством и задав произвольное начальное распределение температуры $T(x, y, z, 0) = T_n$, далее, методом последовательного приближения, можно найти установившуюся функцию $T(x, y, z, \tau^*) = f(x, y, z)$, которая и может быть принята за начальное распределение температуры в грунте. В этом выражении τ^* – время, после которого произвольное начальное распределение температуры в грунте в годовом режиме его формирования не оказывает влияние на исследуемые процессы. Далее рассчитываемое распределение температур в грунте в течение года и будет представлять исходные данные для расчета теплового взаимодействия с коллекторами теплового насоса.

В нашей задаче важно определить температурный режим на глубине ≈ 1 м. На этой отметке практически не сказываются суточные изменения температуры наружного воздуха [1, с. 234]. Величина и амплитуда которых определяется радиационным балансом на поверхности. По этой причине возможно исключение радиационного теплообмена из граничных

условий на поверхности массива. На этой глубине формирование температурного режима грунтового массива определяется преимущественно режимом среднемесячных температур, изменение указанных климатических факторов близко к закону гармонических колебаний с периодом в 1 год.

Конвективный тепловой поток на поверхности почвы, $Q_k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, определяется следующим соотношением [2, с. 64]:

$$Q_k = \alpha \cdot (t_{\text{пз}} - t_{\text{н}}), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплообмена; $t_{\text{пз}}$ – температура поверхности Земли, °С (в начальный момент времени принимается равной произвольно заданной температуре массива грунта на отметке $h = 0$); $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °С. принимается равной режиму среднемесячных температур.

Для расчета величины α существует ряд упрощенных эмпирических формул, учитывающих только скорость ветра [3, с.50]:

$$\text{при } 5 \frac{\text{м}}{\text{с}} < v < 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} \begin{cases} \alpha = 6,5 \cdot v^{0,78} \\ \alpha = 7,56 \cdot v^{0,78} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{при } 0 \frac{\text{м}}{\text{с}} < v < 5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \begin{cases} \alpha = 5,3 + 3,6 \cdot v \\ \alpha = 3,8 + 3,1 \cdot v \\ \alpha = 5,3 + 3,1 \cdot v \\ \alpha = 6,16 + 4,19 \cdot v. \end{cases} \quad (5)$$

Выше отмечено, что изменение среднемесячных значений температуры наружного воздуха в течение года близко к закону гармонических колебаний.

$$t_{\text{сут}} = t_{\text{ср}} + A_t \cdot \cos \left(\frac{z' - z^{\text{max}}}{365} \cdot 2 \cdot \pi \right), \quad (6)$$

где $t_{\text{сут}}$ – температура в текущие сутки, соответствующая режиму среднемесячных температур, °С; $t_{\text{ср}}$ – среднегодовое значение температуры, °С; A_t – годовая амплитуда изменения среднемесячных температур, °С; z' – текущее время в сутках, отсчитанное от 1 января, сут; z^{max} – время достижения температурой максимума, отсчитанное от 1 января, сут.

Годовая амплитуда изменения температуры рассчитывается следующим образом:

$$A_1 = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2}, \quad (7)$$

где t_{\max} и t_{\min} – соответственно максимальное и минимальное среднесуточное значение параметра.

Величину среднегодовой, а также максимальной и минимальной среднесуточной температуры наружного воздуха можно получить в [4, табл. 1].

Для того чтобы определить значение величины z^{\max} при расчете температуры наружного воздуха, можно воспользоваться информацией о пике достижения максимума температурой, которую для текущего календарного года можно найти на официальном сайте государственного учреждения «Белгидромет» на главной странице в разделе «Информация климатолога».

Т. к. суточные колебания температуры не сказываются на отметке $h = 1$ м от поверхности Земли, и глубина промерзания грунтов на территории Республики Беларусь составляет 55–73 см [5, с. 76], то, для физико-математического моделирования распределения температуры внутри массива грунта достаточно определить среднесуточную температуру наружного воздуха в каждые сутки года.

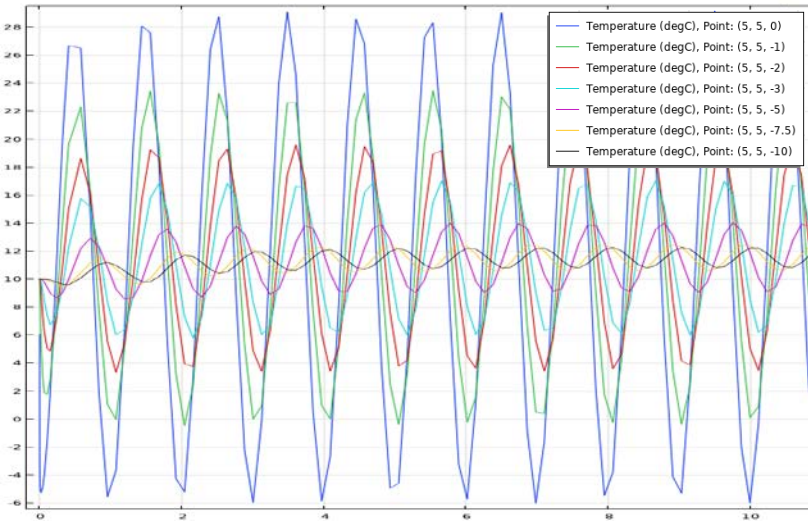


Рис. 1. Температура расчетного массива грунта с теплопроводностью 1 Вт/(м·К)

С помощью программы для численного моделирования методом конечных элементов COMSOL Multiphysics, был сделан расчет воздействия