

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВДОЛЬ КОЛЛЕКТОРА С РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧЕЙ РАСХОДА ПО ДЛИНЕ

При теплотехническом проектировании системы подпочвенного обогрева важнейшим параметром является определение температуры теплоносителя по длине трубопроводов.

Температура теплоносителя вдоль обогревательного трубопровода (ось Z) в таких системах (рисунок 1) может быть рассчитана по формулам, приведенным в [1, 2, 6]. Однако, методы, изложенные в [1, 2, 6] справедливы только для случая постоянного расхода жидкости в трубопроводе и, следовательно, не могут быть использованы для определения температуры теплоносителя коллектора (ось X), так как по его длине происходит раздача расхода. Для равномерного нагрева всей площади обогреваемого поля по длине коллектора в единицу времени в каждый обогревательный трубопровод должно отсоединяться одинаковое количество теплоносителя с одинаковой температурой, поэтому нами была поставлена задача получить аналитическое решение для расчета температуры теплоносителя вдоль коллектора с равномерной раздачей расхода.

Рассмотрим коллектор из последовательно соединенных труб различных диаметров и длин, уложенный ниже пахотного слоя, по которому пропускается теплоноситель – вода (рисунок 2а). В общем случае материал труб может быть различным.

Заданы расход, диаметры труб и длины участков. По коллектору, составленному из последовательно соединенных труб, происходит непрерывное равномерное отделение расхода по длине. Заданный режим отделения воды по длине коллектора обеспечивается путем изменения его диаметра по длине.

Требуется определить изменение температуры воды по длине коллектора.

На участке 0-1 выделим элемент бесконечно малой длины dX (рисунок 2б). Причем допускаем, что элемент расположен в грунте, температура и параметры которого постоянны, а физические свойства теплоносителя (воды) в трубе (теплоемкость, вязкость и плотность) по длине практически не изменяются.

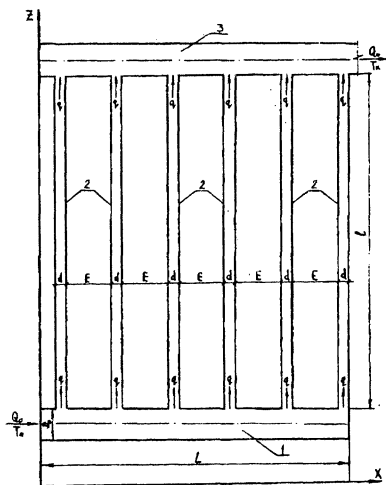


Рисунок 1 – Схема системы подпочвенного обогрева:
 1 – коллектор-распределитель; 2 – трубы-обогреватели;
 3 – коллектор-сборник

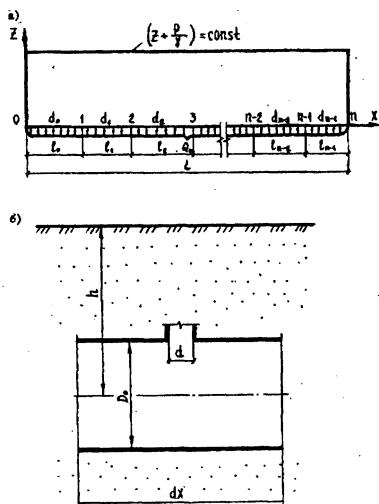


Рисунок 2 – Расчетная схема

Уравнение теплового баланса выделенного элемента dX будет иметь вид

$$FC_B \frac{\partial T}{\partial \tau} dx \cdot d\tau = F\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} dx \cdot d\tau - \frac{\partial}{\partial X} (C_B \cdot QT) dx \cdot d\tau + C_B \frac{\partial Q}{\partial X} T \cdot dx \cdot d\tau - \frac{T - T_B}{R_T} \cdot dx \cdot d\tau, \quad (1)$$

где F – площадь коллектора;

C_B – удельная теплоемкость воды;

λ – коэффициент теплопроводности воды;

Q – расход воды в коллекторе;

T – температура теплоносителя (воды);

T_B – температура воздуха;

R_T – термическое сопротивление передаче тепла от единицы длины коллектора в грунт, определяемое по зависимости [5]:

$$R_T = \frac{1}{2\pi\lambda_{ГР}} \ln \left[\frac{2h}{D} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 1} \right], \quad (2)$$

где $\lambda_{ГР}$ – коэффициент теплопроводности грунта;

D – диаметр трубопровода;

h – заглубление до оси коллектора, вместо которого по реко-

мендациям [4], надо подставить в (2) $h_{эке} = h + \frac{\lambda_{ГР}}{\alpha}$;

α – суммарный коэффициент теплоотдачи грунта воздуху путем конвекции, радиации и испарения;

τ – время.

При этом, следуя [3], полагали, что влияние изменения температуры на участке dX на теплопередачу трубы в грунт не велико и им можно пренебречь.

Если процесс стационарен, и пренебречь теплопроводностью вдоль оси X , то уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial X} (C_B QT) + C_B \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \cdot T - \frac{T - T_B}{R_T} = 0. \quad (3)$$

После некоторых преобразований имеем

$$C_B \cdot Q \cdot \frac{\partial T}{\partial X} - \frac{T - T_B}{R_T} = 0. \quad (4)$$

Разделив выражение (4) на $C_B Q$, получим

$$\frac{dT}{dX} + \frac{T - T_B}{C_B R_T Q} = 0. \quad (5)$$

Обозначив $\theta = T - T_B$, получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка, частное решение которого при условии $\theta_{x=0} = \theta_0$ дает в общем виде функцию распределения температуры по длине участка 0-1:

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[-\frac{1}{C_B} \int_0^{X_{01}} \frac{dx}{R_{T0} Q} \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что падение температуры теплоносителя по длине участка 0-1 коллектора, уложенного в грунт, определяется характером изменения расхода теплоносителя и термическим сопротивлением передачи тепла в грунт на этом участке коллектора.

При непрерывном равномерном отделении воды расход в любом сечении коллектора

$$Q(\bar{X}) = Q_0 \cdot (1 - \bar{X}), \quad (7)$$

где Q_0 – расход воды в начальном сечении коллектора;

\bar{X} – состояние от начального до рассматриваемого сечения коллектора, отнесенное ко всей длине коллектора L ($0 < \bar{X} < 1$).

Подставив зависимость (7) в (6), получим

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[-\frac{L}{C_B Q_0} \int_0^{\bar{X}_{01}} \frac{d\bar{X}}{R_{T0}(1 - \bar{X})} \right]. \quad (8)$$

После интегрирования (8) при $R_{T0} = \text{const}$, получаем для участка 0-1 коллектора

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[\frac{L}{C_B R_{T0} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{01}}| \right], \quad (9)$$

где $\theta_0 = T_0 - T_B$;

T_0 – температура поверхности коллектора в начальном сечении, практически равная при водяном обогреве температуре теплоносителя.

Окончательно уравнение для определения температуры теплоносителя (воды) в сечении коллектора $0 \leq \overline{X_{01}} \leq \overline{\ell_0}$, уложенного в грунт, с равномерной раздачей по длине примет вид

$$T_{01} = (T_0 - T_B) \cdot \exp \left[\frac{L}{C_B R_{T0} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{01}}| \right] + T_B \quad (10)$$

Используя (5), можно найти соответственно для остальных участков коллектора

$$\left. \begin{aligned} T_{12} &= (T_1 - T_B) \cdot \exp \left[\frac{L}{C_B R_{T1} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{12}}| \right] + T_B; \\ T_{23} &= (T_2 - T_B) \cdot \exp \left[\frac{L}{C_B R_{T2} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{23}}| \right] + T_B; \\ T_{[(n-1)-n]} &= (T_{n-1} - T_B) \cdot \exp \left[\frac{L}{C_B R_{T(n-1)} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{[(n-1)-n]}}| \right] + T_B; \\ T_{[(n-1)-n]} &= T_n \text{ при } \overline{X_{[(n-1)-n]}} = \overline{\ell_{n-1}} = \frac{\ell_0 + \ell_1 + \dots + \ell_{n-1}}{L}, \end{aligned} \right\} (11)$$

где T_1, T_2, \dots, T_n – температура поверхности трубы соответственно в конце нулевого, первого и $n-1$ участков коллектора;

$R_{T0}, R_{T1}, \dots, R_{T(n-1)}$ – термическое сопротивление передачи тепла от трубы в грунт соответственно на участке коллектора 0-1, 0-2 и $[(n-1)-n]$.

Таким образом, изменение температуры воды вдоль коллектора, уложенного в грунт, с равномерной раздачей по длине можно произвести по формулам (10) и (11).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронов, С.Н. Определение глубины заложения водоводов. – М.: Стройиздат, 1950.
2. Иоффе, И.А. Влияние уклона труб и температуры теплоносителя на тепловой режим почвы // Механиз. и электрифик. сельск. хоз-ва, 1972. – № 7. – С. 42-43.
3. Куртнер, Д.А., Усков, И.Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 232 с.
4. Кутателадзе, С.С., Рабинович, А.Л. Расчет почвенного обогрева теплиц // Отопление и вентиляция, 1935, – № 12. – С. 19-23.
5. Шубин, Е.П. О тепловых потерях трубы, уложенной в грунт// Известия ВТИ, М.: Энергоиздат, 1934. – № 4. – С. 43-56.
6. Kendrick, J., Havens, J. Heat transfer models for a subsurface water pipe soil warming system // J. Environ. Qual., 1973. – V.2. – P.188-190.