УДК 536.68:631.6

А.И. МУРАШКО, акад. (ВАСХНИЛ),
Н.Н. ЛИНКЕВИЧ
Н.Г. ХОЛОДОК, канд.техн.наук (ЦНИИКИВР)

ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ПОДПОЧВЕННОГО ОБОГРЕВА ГРУНТА ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ВОДАМИ ТЭС (АЭС) ПО ПЕРФОРИРОВАННЫМ ТРУБОПРОВОДАМ

Планируемое строительство ТЭС и АЭС в Европейской части СССР — зоне более полного использования земельных и водных ресурсов — ставит перед энергетикой ответственную задачу: одновременно с разработкой мероприятий по охране водного и воздушного бассейнов обосновать целесообразность изъятия из сельскохозяйственного оборота значительных земельных площадей для создания на них прудов-охладителей. Отказ же от них и переход на строительство градирен приводит к значительному удорожанию электростанций. Переход на прямоточную систему охлаждения, выгодный для энергетики, вместе с тем ведет к тепловому "загрязнению" водоемов.

Всего в 1990 г. от конденсаторов турбоагрегатов ТЭС и АЭС в СССР будет отводиться около 300—400 км^3 циркуляционной воды, температура которой составляет от 15° С в холодное время года до 40 $^\circ$С в теплое. Часть этой воды может служить источником высокопроизводительного орошения сельскохозяйственных культур, а также для подогрева грунта, как открытого, так и защищенного в весенне-летне-осенних теплицах, особенно в зонах с неустойчивыми климатическими условиями, к которым относится и БССР.

Как видно из вышеизложенного, хотя потенциальные возможности сельскохозяйственного использования теплой воды имеются, они практически не реализуются. Необходимо в будущем при проектировании даже малых ТЭЦ и ТЭС предусматривать частичное, а где это возможно, и полное охлаждение циркуляционных вод путем использования их в сельскохозяйственном производстве, что создаст условия для значительного повышения урожайности и в некоторой степени — для повышения КПД турбоагрегатов.

Одним из способов подачи теплой воды на поле может служить мелиоративная сеть, примыкающая к территории электростанции. Вопросы расчета теплового воздействия на корневую систему и поверхность почвы при подаче теплой воды в подпочвенные перфорированные трубопроводы еще не нашли своего отражения в отечественной и зарубежной литературе. В этой связи рассмотрим решение задачи применительно к перфорированным трубопроводам постоянного сечения, уложенным в зоне корневой системы растений, по которой пропускается теплоноситель — вода (рис. 1). Вода, вытекая через отверстия перфорированного трубопровода в грунт, отдает ему тепло и увлажняет околотрубное пространство. Аналогичную задачу для расчета перфорированных пленочных воздуховодов в теплицах решал Д.А. Куртенер [1].

По закону сохранения энергии баланс выделенного элемента длиной Δl слагается из количества тепла, поступающего в рассматриваемый элемент через сечение I—I (G_1), количества тепла, уходящего из элемента через сече-

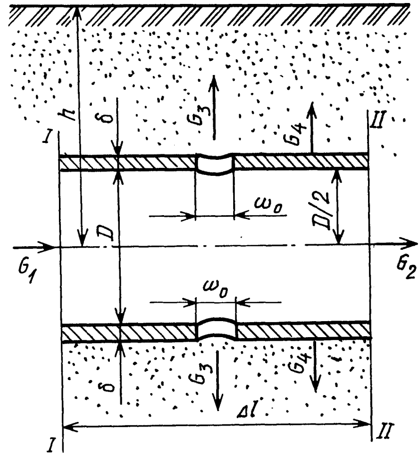

Рис. 1. Расчетная схема элемента обогревающего трубопровода

ние II—II (G_2) и боковые отверстия (G_3), а также теплопередачи трубы воздуху через грунт (G_4):

$$G_1 = G_2 + G_3 + G_4 . \qquad (1)$$

Раскроем значения составляющих уравнения теплового баланса выделенного элемента. Причем допускаем, что элемент расположен в грунте, температура и параметры которого постоянны, а физические свойства теплоносителя (воды) в перфорированной трубе (теплоемкость, вязкость и плотность) по ее длине практически не изменяются.

Количество тепла, поступающего в элемент через сечение I—I и выходящего через сечение II—II и боковые отверстия:

$$G_1 = c_в Q(l)\, T(l) ; \qquad (1,а)$$

$$G_2 = c_в Q(l + \Delta l)\, T(l + \Delta l) ; \qquad (1,б)$$

$$G_3 = c_в [Q(l) - Q(l + \Delta l)]\, T(l), \qquad (1,в)$$

Количество тепла, уходящего путем передачи тепла трубы воздуху через грунт, можно записать в виде

$$G_4 = \frac{T(l) - T_п}{R_т} \Delta l, \qquad (1,г)$$

где $c_в$ — удельная теплоемкость воды; $Q(l)$, $Q(l + \Delta l)$ — расход воды в перфорированном трубопроводе в сечении l и $l + \Delta l$ соответственно; $T(l)$, $T(l + \Delta l)$ — температура теплоносителя в указанном трубопроводе; $T_п$ — температура воздуха над поверхностью почвы; $R_т$ — термическое сопротивление передаче тепла от единицы длины трубы воздуху через грунт, определяемое по зависимости [2]

$$R_т = \frac{1}{2\pi\lambda_{гр}} \ln \left[\frac{2S}{\pi D} Sh \left(2\pi \frac{h}{S} \right) \right], \qquad (1,д)$$

где $\lambda_{гр}$ — коэффициент теплопроводности грунта; S — расстояние между трубами; D — диаметр трубы; h — заглубление до оси трубы, вместо которого, по рекомендациям [2], надо подставлять в (1, д) $h_{экв} = h + \frac{\lambda_{гр}}{\alpha}$ (α — суммарный коэффициент теплоотдачи от грунта воздуху путем конвекции, радиации и испарения).

При этом полагается, что влияние перфорации трубы на термическое сопротивление и изменение температуры на участке Δl на теплопотери путем передачи тепла трубы воздуху через грунт невелико и им можно пренебречь.

Если неизвестные функции $Q(l + \Delta l)$ и $T(l + \Delta l)$ разложить в ряд Тейлора и сохранить только два первых члена ряда, то после подстановки значений уравнений (1, *а*) – (1, *г*) в уравнение (1) и упрощения, а также пренебрежения членами, содержащими Δl^2 (как малыми величинами второго порядка), получим:

$$\frac{dT}{dl} + \frac{T(l) - T_п}{c_в R_т Q(l)} = 0.$$

Обозначив $\theta = T(l) - T_п$, составим дифференциальное уравнение, частное решение которого при условии $\theta_{l=0} = \theta_0$ дает в общем виде функцию распределения температуры по длине потока:

$$\theta = \theta_0 \exp\left[-\frac{1}{R_т c_в}\int_0^l \frac{dl}{Q(l)}\right]. \qquad (2)$$

Выражение (2) показывает, что падение температуры потока теплоносителя по длине перфорированного трубопровода, уложенного в грунт, определяется характером изменения расхода теплоносителя по длине и термическим сопротивлением передачи тепла трубопровода воздуху через грунт.

Характерной особенностью движения воды в перфорированном трубопроводе является то, что по его длине происходит изменение массы движущейся жидкости. Отделение отсоединяющейся массы от общего потока происходит с определенными затратами энергии. Поэтому для расчета потерь напора при движении воды в перфорированных трубопроводах следует пользоваться зависимостями, основанными на законах гидравлики переменной массы [3]. Для стационарного режима Г.А. Петров получил следующее уравнение:

$$-\frac{dH}{dl} = \frac{2\alpha_0 Q}{g\omega^2} \cdot \frac{dQ}{dl} + \frac{\lambda Q^2}{2g\omega^2 D}, \qquad (3)$$

где dH/dl – изменение напора по длине перфорированного трубопровода; α_0 – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости по живому сечению; Q – расход жидкости в любом сечении; ω – площадь живого сечения; g – ускорение силы тяжести; λ – коэффициент гидравлического трения при равномерном режиме движения.

В гидротехническом строительстве в ряде случаев необходим раздаваемый расход, постоянный по всей длине трубопровода. Тогда требуемый напор для преодоления сопротивления движению можно получить после интегрирования уравнения (3) при условии $dQ/dl = \text{const}$.

Обозначим $dQ/dl = q = Q_н/L$, где $Q_н$ – расход в начальном сечении трубопровода; L – длина трубопровода.

Расход в любом сечении трубопровода

$$Q = ql = \frac{Q_н}{L} l. \qquad (4)$$

Введем безразмерную величину $\bar{l} = l/L$.

Уравнение (3) запишем в виде

$$-\frac{dH}{dl} = \frac{2\alpha_0 Q_н^2}{g\omega^2}(1-\bar{l}) + \frac{\lambda Q_н^2 L}{2g\omega^2 D}(1-\bar{l})^2. \tag{5}$$

После интегрирования уравнения (5) получим зависимость для определения напора в любом сечении перфорированного трубопровода:

$$H(x) = \frac{\alpha_0 Q_н^2}{g\omega^2}(1-\bar{l})^2 + \frac{\lambda Q_н^2 L}{6g\omega^2 D}(1-\bar{l})^3.$$

Необходимый напор в начальном сечении, обеспечивающий равномерную раздачу воды, установим при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \bar{l} = 0, & Q = Q_н; \\ \bar{l} = 1, & Q = q; \end{cases}$$

$$H_н = \frac{Q_н^2}{2g\omega^2}\left(2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}\right). \tag{6}$$

Задаваясь напором в начальном сечении, можем из уравнения (6) получить формулу для расхода в начальном сечении:

$$Q_н = \sqrt{\frac{2H_н g\omega^2}{2\alpha_0 + \lambda L/3D}}, \tag{7}$$

так как при равномерной раздаче

$$Q(l) = Q_н(1-\bar{l}). \tag{8}$$

Подставив зависимость (8) с учетом (7) в (2), получим

$$\theta = \theta_0 \exp\left[-\frac{1}{c_в}\frac{L}{R_т}\sqrt{\frac{2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}}{2H_н g\omega^2}}\int_0^l \frac{d\bar{l}}{(1-\bar{l})}\right]. \tag{9}$$

После интегрирования (9)

$$\theta = \theta_0 \exp\left[\frac{L}{c_в R_т}\sqrt{\frac{2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}}{2H_н g\omega^2}}\ln|1-\bar{l}|\right] \tag{10}$$

($\theta_0 = T_0 - T_п$; T_0 – температура поверхности трубы в начальном сечении, практически равная при водяном обогреве температуре теплоносителя).

Окончательно уравнение для определения температуры теплоносителя (воды) в сечении трубопровода $0 \leq \bar{l} < 1$, уложенного в грунт, с равномерной раздачей теплоносителя по всей длине примет вид

$$T(l) = (T_0 - T_п)\exp\left[\frac{L}{c_в R_т}\sqrt{\frac{2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}}{2H_н g\omega^2}}\ln|1-\bar{l}|\right] + T_п. \tag{11}$$

Теплоотдача произвольного элемента перфорированной трубы определяется количеством тепла, которое выделяется при остывании струй воды, истекающих через боковые отверстия трубы, а также интенсивностью теплообмена между трубой и грунтом. При указанных выше условиях теплостдача может быть представлена формулой

$$\Delta G = c_{в}\Delta Q\theta + \frac{\theta}{R_{т}}\Delta l .$$

Если $\lim\limits_{\Delta l \to 0} = \Delta G/\Delta l$, выражение для теплоотдачи приобретает вид

$$k = \theta\left(c_{в}\frac{dQ}{dl} + \frac{1}{R_{т}}\right), \qquad (12)$$

Подставив в формулу (12) значения Q и θ, определяемые выражениями (4) и (10), после преобразований получим

$$k = \left(\frac{c_{в}}{L}\sqrt{\frac{2H_{н}g\omega^2}{2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}}} + \frac{1}{R_{т}}\right)\theta_0 \exp\left(\frac{L}{c_{в}R_{т}}\sqrt{\frac{2\alpha_0 + \frac{\lambda L}{3D}}{2H_{н}g\omega^2}}\ln|-1 - \bar{l}|\right). \qquad (13)$$

Полученное выражение при $\bar{l} = 0$ дает значение теплоотдачи в начале трубы k_0. Разделив выражение (13) на k_0, получим формулу для теплоотдачи перфорированной трубы:

$$k = k_0 \exp\left[\frac{L}{c_{в}R_{т}}\sqrt{\frac{2\alpha_0 + \lambda L/3D}{2H_{н}g\omega^2}}\ln|1 - \bar{l}|\right]. \qquad (14)$$

Уравнения (11) и (14) позволяют определить температуру теплоносителя (воды) и теплоотдачу перфорированной трубы в сечении $0 \leqslant \bar{l} < 1$, уложенной в грунт, с равномерной раздачей теплоносителя (воды) по длине трубопровода.

Литература

1. Куртенер Д.А., Усков И.Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. — Л., 1982. — С. 232. 2. Кутателадзе С.С., Рабинович А.Л. Расчет почвенного обогрева теплиц // Отопление и вентиляция. — 1935. — № 12. — С. 19—23. 3. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. — Харьков, 1964. — С. 224.