

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗЕМНОЙ КОРЫ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ. ТЕПЛОВАЯ ТРУБА

Критерием теплового состояния земного шара является поверхностный градиент температуры, позволяющий судить о потерях тепла Земли. Величина  $\sigma$ , соответствующая углублению в метрах, при котором температура повышается на  $1^\circ\text{C}$ , называется геотермической ступенью.

Температура горных пород на глубине  $H$  приближенно может быть определена по формуле

$$T = t_0 + \frac{(H - h)}{\sigma},$$

где  $t_0$  – средняя температура земной коры на глубине  $h$  зоны постоянных температур (1,5–40 м).

Обычно теплоносный слой имеет пористую структуру – скальные породы имеют поры, заполненные водой (пористость оценивается коэффициентом  $\alpha$ ). В расчетной практике характеристики геотермальной энергетики обычно относят к  $1 \text{ км}^2$  поверхности  $S$ . Теплоемкость пласта  $c_{\text{пл}}$ , Дж/К, можно определить по уравнению

$$c_{\text{пл}} = [\alpha \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{гр}} c_{\text{гр}}] h S,$$

где  $\rho_{\text{в}}$  и  $c_{\text{в}}$  – соответственно плотность и изобарная удельная теплоемкость воды;  $\rho_{\text{гр}}$  и  $c_{\text{гр}}$  – плотность и удельная теплоемкость нагретых пород (пород пласта);  $h$  – толщина слоя нагретого пласта.

Если задать минимально допустимую температуру, при которой используется тепловая энергия пласта  $T_1$ , К, то можно оценить его тепловой потенциал к началу эксплуатации, Дж:

$$E_0 = c_{\text{пл}} (T_2 - T_1).$$

Постоянную времени пласта  $\tau_0$  (возможное время его использования, лет) в случае отвода тепловой энергии путем закачки в него воды с объемным расходом  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , можно определить по уравнению

$$\tau_0 = c_{\text{пл}} / (V \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}).$$

Считают, что тепловой потенциал пласта во время его разработки изменяется по экспоненциальному закону

$$E = E_0 \exp(-\tau/\tau_0),$$

где  $\tau$  – число лет с начала эксплуатации.

Тепловая мощность геотермального пласта в момент времени  $\tau$  (лет с начала разработки), Вт:

$$\left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau} = -\frac{E_0}{\tau_0} \exp\left( -\frac{\tau}{\tau_0} \right).$$

Эффективная транспортировка тепла из недр Земли с высокой интенсивностью может осуществляться также с помощью специального устройства – тепловой трубы.

Тепловая труба представляет собой замкнутую систему, которая обеспечивает высокую теплопроводность за счет использования теплоты парообразования жидкости.

Как правило, в трубу в виде прямого цилиндра (рисунок) диаметром  $d_{тр}$  вводят небольшое количество жидкости, создают вакуум (откачивают воздух) и герметизируют. При подводе тепла к зоне испарения 1 жидкость переходит в пар, давление насыщения паров в зоне резко повышается, пар 2 движется вверх к центру трубы в коридоре диаметром  $d_{п}$  в зону меньшим давлением, переходит в жидкость в зоне конденсации 3 и конденсат 4 стекает по стенкам вниз. Тепловая труба, в которой возврат конденсата в зону испарения осуществляется под действием гравитационного поля, называется *термосифоном*. Из-за особенности принципа работы термосифон может работать только тогда, когда зона испарения находится ниже зоны конденсации (т. е. труба должна располагаться вертикально или с небольшим уклоном).

Для обеспечения возврата конденсата в зону испарения при любой ориентации тепловой трубы было предложено заменить гравитационную силу капиллярной, возникающей при смачивании рабочей жидкостью капиллярно-пористого материала – фитиля.

Энергетический баланс вертикальной капиллярной тепловой трубы состоит из двух уравнений: массового и гидродинамического.

Массовое уравнение выражает собой равенство расходов пара  $G_{п}$  и конденсата  $G_{к}$ :

$$G_{п} = G_{к};$$

$$v_{п} d_{п}^2 = v_{к} (d_{тр}^2 - d_{п}^2),$$

где  $v_{п}$ ,  $v_{к}$  – скорость движения пара и конденсата соответственно.

Гидродинамическое уравнение выражает собой равенство перепадов давления по паровому  $\Delta p_{п}$  и конденсационному  $\Delta p_{к}$  пути между зоной испарения и зоной конденсации:

$$\Delta p_{п} = \Delta p_{к};$$

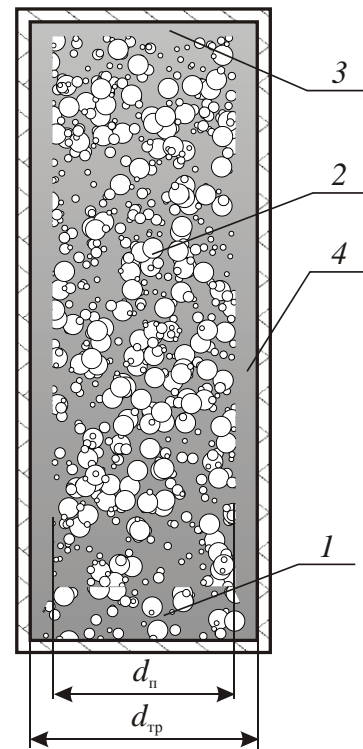


Схема  
тепловой

При  
этой  
по  
с  
зоне

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{R_{\text{кап}}} + \rho_{\text{к}} g l = \lambda_{\text{п}} \frac{l}{d_{\text{п}}} \frac{\rho_{\text{п}} v_{\text{п}}^2}{2} + \lambda_{\text{к}} \frac{l}{K(d_{\text{тр}} - d_{\text{п}})} \frac{\rho_{\text{к}} v_{\text{к}}^2}{2},$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение рабочей жидкости;  $\theta$  – угол смачивания;  $R_{\text{кап}}$  – радиус капилляра пористого материала;  $\rho_{\text{к}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  – плотность конденсата и пара, соответственно;  $l$  – транспортная длина рабочей жидкости;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления среды;  $K$  – проницаемость материала.

Тепловое уравнение представляет собой сумму изменений энергии жидкости и пара. Количество передаваемого тепла определяется из уравнения

$$Q = Gr,$$

где  $r$  – теплота парообразования, зависящая от рода жидкости и давления внутри трубы.

### Задачи для практических занятий

#### Задача 14.1

Определить количество геотермальной энергии теплоносного пласта толщиной  $h = 0,8$  км при глубине залегания  $z = 2,5 + 0,2 \cdot N$  (км), если заданы характеристики пласта: плотность  $\rho_{\text{тр}} = 2700$  кг/м<sup>3</sup>; пористость  $\alpha = N\%$ , удельная теплоемкость  $c_{\text{тр}} = 840$  Дж/(кг·К); геотермическая ступень  $\sigma = 33$  м/°С.

Среднюю температуру поверхности  $t_0$  принять равной 10°С. Удельная теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4200$  Дж/(кг·К); плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Минимально допустимую температуру пласта принять равной  $t_1 = 40$ °С. Расчет произвести по отношению к площади поверхности 1 км<sup>2</sup>.

Определить также постоянную времени извлечения тепловой энергии  $\tau_0$  (лет) при закачивании воды в пласт и расходе ее  $V = 0,1$  м<sup>3</sup>/с. Какова будет тепловая мощность, извлекаемая первоначально  $(dE/d\tau)_{\tau=0}$  и через 10 лет  $(dE/d\tau)_{\tau=10}$  ?

#### Задача 14.2

Двухметровая капиллярная тепловая труба имеет внутренний диаметр трубы  $d_{\text{тр}} = 20 + N$  см, а диаметр парового канала  $d_{\text{п}} = 0,7 \cdot d_{\text{тр}}$ . Рабочая жидкость – вода. Поверхностное натяжение  $\sigma = 0,073$  Н/м; угол смачивания  $\theta = 20^\circ$ ; плотность конденсата  $\rho_{\text{к}} = 900$  кг/м<sup>3</sup> и пара  $\rho_{\text{п}} = 0,9$  кг/м<sup>3</sup>; радиус капилляра пористого материала  $R_{\text{кап}} = 0,2$  мм; проницаемость материала  $K = 0,6$ , коэффициент гидравлического сопротивления среды  $\lambda = 0,05$ ; теплота парообразования  $r = 3000$  кДж/кг. Определить тепловую мощность тепловой трубы.