

4. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

В настоящем разделе представлены такие случаи температурных полей в основании коллекторов тепловых насосов:

1. Тепловые поля в грунтовом основании, образованные в ходе теплообмена между основанием четырьмя U-образными коллекторами теплового насоса неограниченной длины.

2. Тепловые поля в основании плоского грунтового коллектора прямоугольной формы.

3. Тепловые поля в грунтовом основании, образованные в ходе теплообмена между основанием и четырьмя U-образными коллекторами теплового насоса конечной длины.

4.1. Температурное поле в основании U-образного коллектора теплового насоса неограниченной длины

Рассмотрим задачу о распределении температурных полей в основании работающего в реверсном режиме U-образного теплового насоса (рис.21). Учтем, что отопительный сезон продолжается 6 месяцев (начало в первых числах октября и завершение – в последних числах марта), а сезон кондиционирования – 3 месяца (начало в первых числах июня и завершение в последних числах августа).

Предположим, что коллекторы находятся во влажном песке (в этом случае согласно данным таблицы 5 удельная теплоотдача составляет

$Q = 20 \frac{Вт}{м^2}$). При этом допустим, что оси четырех коллекторов тепловых насосов находятся друг от друга на расстоянии 5,0 м, а длина

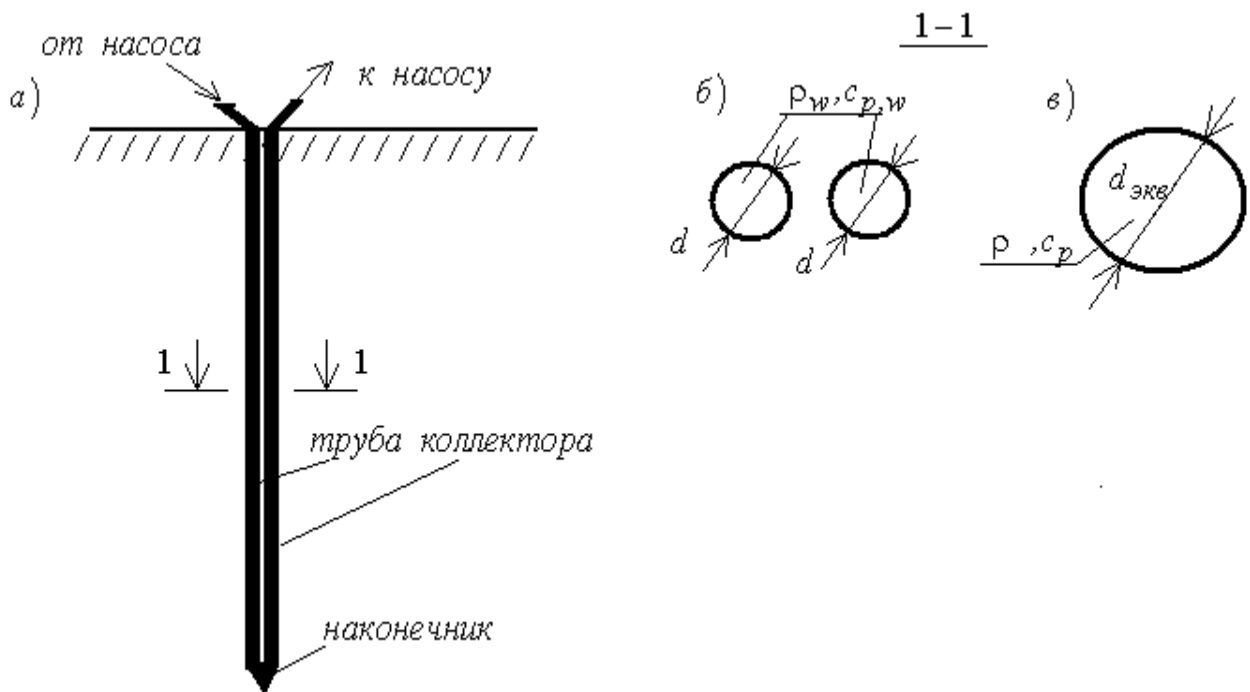


Рис. 21. К определению теплового поля в основании U – образного коллектора теплового насоса

а и б – фактическая схема; в – то же, расчетная с приведенными характеристиками.

Примечание. На рисунке приняты такие обозначения d – фактический диаметр трубы коллектора теплового насоса; $d_{экв}$ – то же, эквивалентный; ρ_w, c_{pw} – соответственно плотность и удельная теплоемкость циркулирующего в зонде

рассола; ρ, c_p – то же, основания

каждого из них равна 25 м (рис. 22). Коллекторы выполнены из поливинилхлоридных труб диаметром 100 мм. Требуется с использованием представленных в таблице 11 данных рассчитать температурное поле на глубине 10 метров (при этом следует учесть, что на этой глубине обусловленная сезонными колебаниями температура основания практически постоянна и равна $T = +10^{\circ}C$).

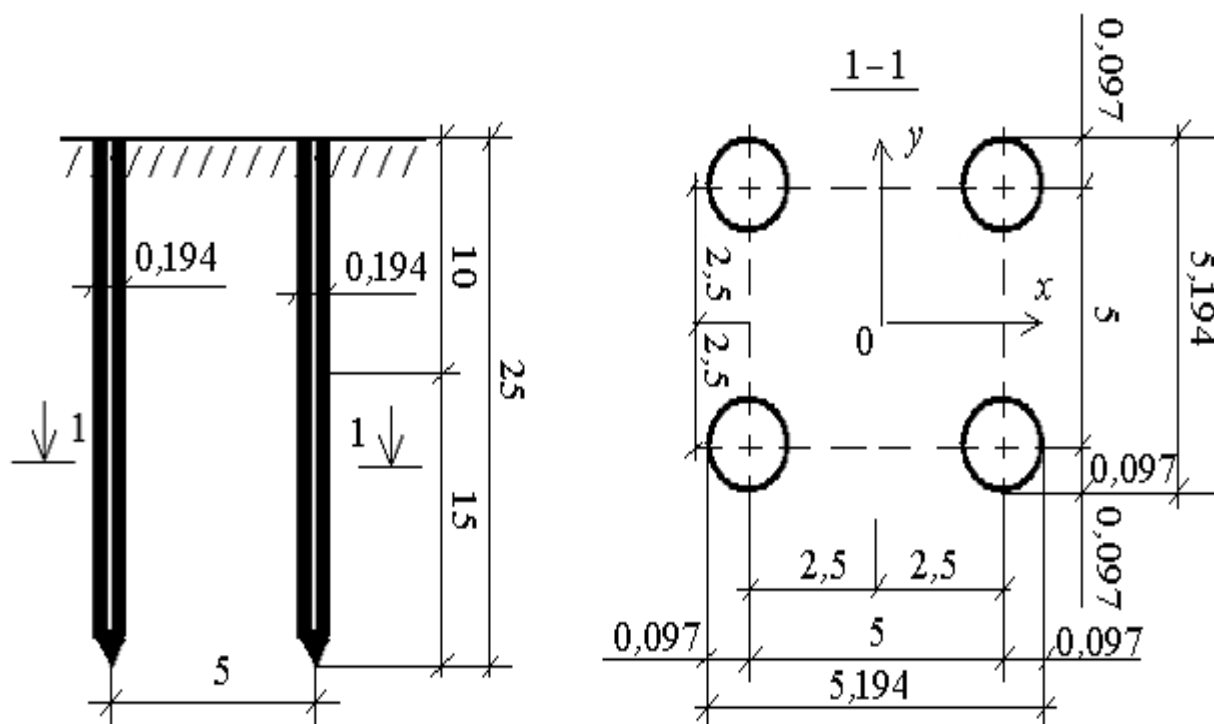


Рис. 22. К расчету теплового поля.

Примечание. Размеры даны в метрах

Таблица 12

Характеристики грунтового основания

№ п/п	Плотность ρ $\frac{кг}{м^3}$	Удельная теплоемкость c_p , $\frac{Вт \cdot сек}{кг \cdot град}$	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{Вт}{м \cdot град}$
1	1980	1130	0,5

Расчет температурного поля следует выполнять в такой последовательности.

1. Вначале определим диаметр эквивалентной скважины. При этом учтем тот факт, что циркуляция рассола осуществляется по двум трубам

(рис. 21), а плотности рассола и слагающего основание грунта отличны друг от друга. Имеем:

$$2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \rho \cdot c \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{экв}}^2}{4}, \text{ откуда:}$$

$$d_{\text{экв}} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw}}{\rho \cdot c}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1000 \cdot 4200}{1980 \cdot 1130}} = 194 \text{ мм} = 0,194 \text{ м.}$$

Здесь ρ_w , c_{pw} , ρ , c , d и $d_{\text{экв}}$ – см. пояснения к рисунку 21.

2. Далее найдем количество удельного тепла, необходимое для отопления и кондиционирования здания. Имеем:

$$q_w = \frac{Q \cdot P_{\text{скв}}}{A_{\text{скв}}} = \frac{Q \cdot \pi \cdot d_{\text{экв}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{экв}}^2}{4}} = \frac{20 \cdot 3,14 \cdot 0,194}{\frac{3,14 \cdot 0,194^2}{4}} = 412 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

Здесь $P_{\text{скв}}$ и $A_{\text{скв}}$ – периметр и диаметр эквивалентной скважины соответственно.

3. Потом следует определить коэффициенты температуропроводности основания a и произведение $\rho \cdot c_p$ [6, 14].

Имеем:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = \frac{0,50}{1980 \cdot 1130} = 2,23 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{сек}} = 0,0008 \frac{\text{м}^2}{\text{час}} = 0,58 \frac{\text{м}^2}{\text{мес}}$$

и

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p &= 1980 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1130 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 2,24 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}} = \\ &= 621 \frac{\text{Вт} \cdot \text{час}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}} = 0,863 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мес}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}} \end{aligned}$$

4. В соответствии с графиками отопления и кондиционирования и имеем такую зависимость удельной энергии от времени:

$$\left. \begin{aligned}
 q_w(t) &= -412 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{если тепловой насос} \\
 &\text{работает в режиме отопления;} \\
 q_w(t) &= 412 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - \text{если тепловой насос} \\
 &\text{работает в режиме кондиционирования;} \\
 q_w(t) &= 412 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - 412 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{если} \\
 &\text{тепловой насос работает в режиме отопления и} \\
 &\text{кондиционирования одновременно.}
 \end{aligned} \right\}, \quad (66)$$

где время t дано в месяцах.

5. Далее с использованием формулы (39) и принципа суперпозиции найдем температурное поле от распределенного источника теплоты в слое грунта единичной толщины. Имеем:

$$T(r,t) = \frac{2 \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p} \cdot \int_0^t \frac{q_w(\tau)}{a \cdot (t-\tau)} \cdot \left\{ \int_0^R \exp \left[-\frac{(r-\xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)} \right] \cdot \xi \cdot d\xi \right\} \cdot d\tau, \text{ откуда}$$

$$\left. \begin{aligned}
 T(r,t) &= \int_0^t \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p} \cdot (f_1 + f_2 + f_3 - f_4) \cdot d\tau; \\
 f_1 &= \frac{r \cdot \sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\operatorname{erf}(z_1)}{\sqrt{a \cdot (t-\tau)}}; \\
 f_2 &= \frac{r \cdot \sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\operatorname{erf}(z_2)}{\sqrt{a \cdot (t-\tau)}};
 \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

$$\left. \begin{aligned}
 f_3 &= \exp(-z_3); \\
 f_4 &= \exp(-z_4); \\
 z_1 &= \frac{R-r}{2 \cdot \sqrt{a \cdot (t-\tau)}}; \\
 z_2 &= \frac{r}{2 \cdot \sqrt{a \cdot (t-\tau)}}; \\
 z_3 &= \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}; \\
 z_4 &= \frac{(R-r)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}; \\
 R &= \frac{d_{\text{экв}}}{2}
 \end{aligned} \right\}. \tag{67}$$

Далее с использованием подстановки $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ перейдем в (67) к декартовой системе координат. Имеем:

$$\left. \begin{aligned}
 T(x, y, t) &= \int_0^t \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p} \cdot (f_1 + f_2 + f_3 - f_4) \cdot d\tau; \\
 f_1 &= \frac{\sqrt{\pi \cdot (x^2 + y^2)}}{2} \cdot \frac{\text{erf}(z_1)}{\sqrt{a \cdot (t-\tau)}}; \\
 f_2 &= \frac{\sqrt{\pi \cdot (x^2 + y^2)}}{2} \cdot \frac{\text{erf}(z_2)}{\sqrt{a \cdot (t-\tau)}}; \\
 f_3 &= \exp(-z_3); \\
 f_4 &= \exp(-z_4); \\
 z_1 &= \frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{2 \cdot \sqrt{a \cdot (t-\tau)}};
 \end{aligned} \right\}. \tag{68}$$

$$\left. \begin{aligned} z_2 &= \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2 \cdot \sqrt{a \cdot (t - \tau)}}; \\ z_3 &= \frac{x^2 + y^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\ z_4 &= \frac{\left(R - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\ R &= \frac{d_{\text{экв}}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

Далее найдем температурное поле в точке основания с координатами (x, y) , причиной возникновения которого являются n источников тепла $q_{w,i}(t)$, центры которых находятся в точках с координатами (x_i, y_i) (формула (68) и рис. 22). Имеем:

$$T(x, y, t) = T_{\text{осн}}(x, y, t) + \sum_{i=1}^n T[q_{wi}, (x - x_i), (y - y_i), t], \quad (69)$$

где температуру $T[q_{wi}, (x - x_i), (y - y_i), t]$ следует определять по формуле (68), а зависимость выделяемого каждым из источников тепла от времени – по формуле (66). Здесь $T_{\text{осн}}(x, y, t)$ – температура основания в точке с координатами (x, y) в момент времени t , обусловленная сезонными изменениями температурного режима на поверхности основания.

Для рассматриваемого в настоящем разделе конкретного случая зависимость (69) примет вид:

$$T(x, y, t) = 10^0 + T[q_w, (x - 2,5), (y - 2,5), t] + \left. \right\} \quad (70)$$

$$\left. \begin{aligned} &+T[q_w,(x-2,5),(y+2,5),t] + T[q_w,(x+2,5),(y-2,5),t] + \\ &+T[q_w,(x+2,5),(y+2,5),t] \end{aligned} \right\}. \quad (70)$$

Входящие в (70) функции $T[q_{wi},(x-x_i),(y-y_i),t]$ определялись нами по формуле (68). При этом входящие в (68) интегралы вычислялись численно. На основе полученных таким образом данных нами были построены изополя температур для таких вариантов использования тепловых насосов:

–тепловой насос работает только лишь в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа (рис. 23);

–тепловой насос работает только лишь в режиме отопления шесть месяцев с начала ноября по конец марта (рис. 24);

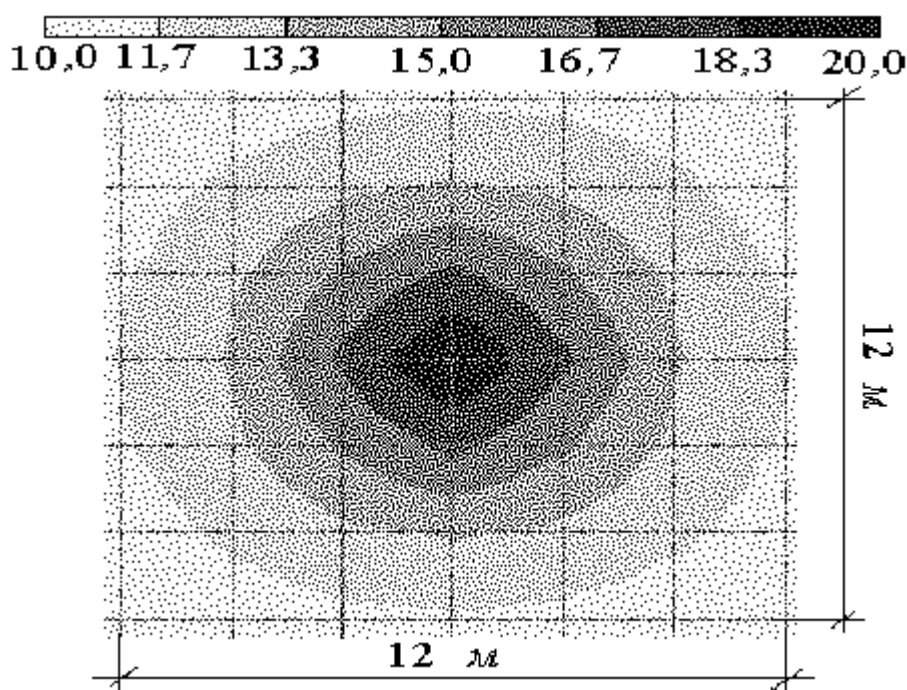


Рис. 23. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 10 метров после работы теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев

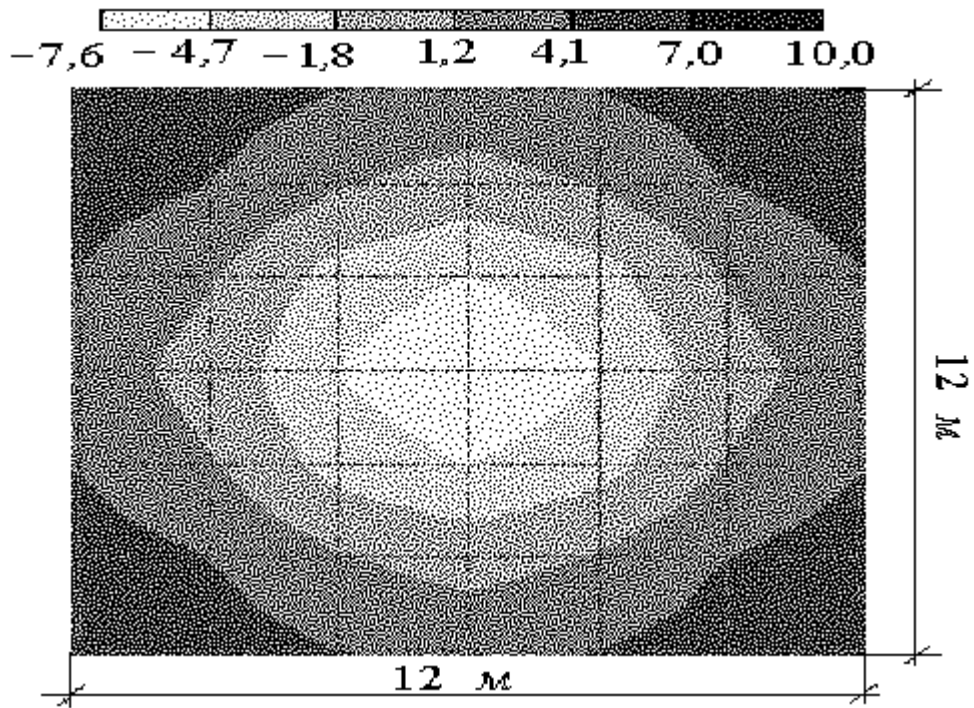


Рис. 24. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 10 метров после работы теплового насоса в режиме отопления в течение 6 месяцев

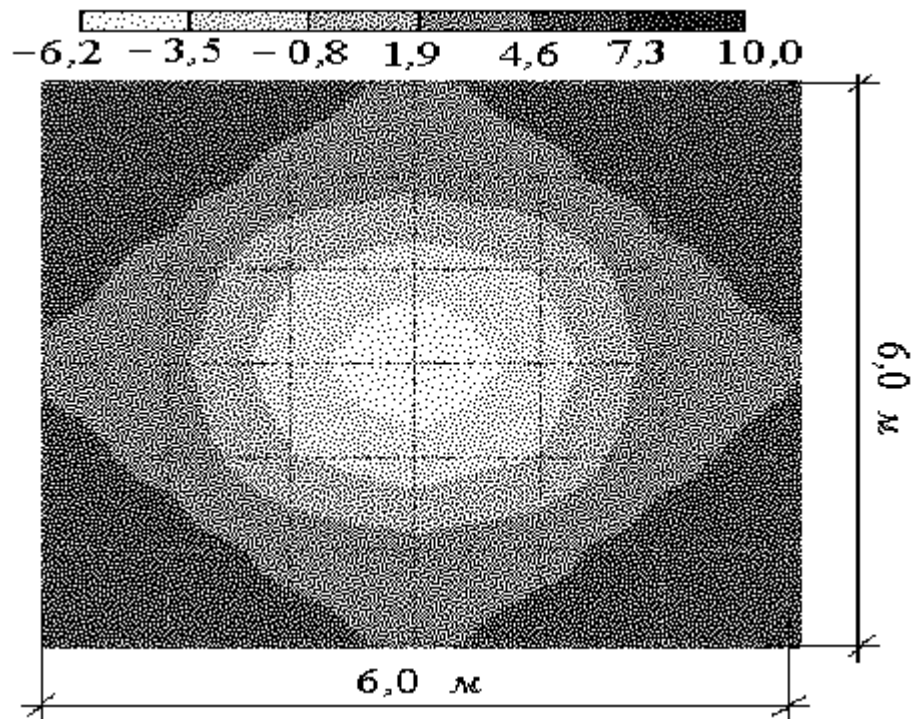


Рис. 25. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 10 метров после работы теплового насоса в режиме кондиционирования 3 месяца и в режиме отопления в течение 6 месяцев

–тепловой насос работает в реверсном режиме (т.е. в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа и в режиме отопления – шесть месяцев с начала ноября по конец марта рис. 25).

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований, позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между U-образными коллекторами тепловых насосов и грунтовыми основаниями на значительной глубине (этот случай соответствует условиям плоской задачи).

2. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может значительно превышать ее природные значения в 1,1...2 раза (рис. 23).

3. Установлено, что при работе теплового насоса в режиме отопления температура основания может быть ниже температуры замерзания воды (рис. 23). Этот факт имеет важное значение в связи с явлением морозного пучения грунта [11].

4. Выявлено, что при функционировании теплового насоса в реверсном режиме имеет менее резкое изменение температурного поля основания, чем это имеет место при его работе только лишь в режиме кондиционирования или только лишь в режиме отопления.

4.2. Температурное поле в основании плоского коллектора теплового насоса конечных размеров

Рассмотрим задачу о распределении температурных полей в основании плоского коллектора, работающего в режимах кондиционирования, отопления а также в реверсном режиме теплового насоса (рис.26). Учтем, что отопительный сезон продолжается 6 месяцев (начало в первых числах октября и завершение – в последних числах

марта), а сезон кондиционирования – 3 месяца (начало в первых числах июня и завершение в последних числах августа).

Предположим, что плоский коллектор теплового насоса находится на глубине 1,6 метра во влажном песке (в этом случае согласно данным таблицы 5 удельная теплоотдача составляет $Q = 20 \frac{Вт}{м^2}$). При этом допустим, что он выполнен из труб диаметром 50 мм, расположенных друг от друга на расстоянии 500 мм, а трубы уложены на участке основания, имеющем в плане размеры 10x10 метров.

Требуется с использованием представленных в таблице 11 данных рассчитать температурное поле в основании.

В данном случае техника расчета температурного поля полностью идентична изложенной в разделе 3.2. Поэтому расчет следует выполнять в такой последовательности.

1. Вначале определим диаметр эквивалентной трубы, с использованием которой осуществляется теплообмен коллектора с основанием. При этом учтем тот факт, что плотности рассола и слагающего основание грунта отличны друг от друга. Имеем:

$$2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \rho \cdot c \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{экв}}^2}{4}, \text{ откуда:}$$

$$d_{\text{экв}} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw}}{\rho \cdot c}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot 4200}{1980 \cdot 1130}} = 68,5 \text{ мм} = 0,069 \text{ м}.$$

Здесь ρ_w , c_{pw} , ρ , c , d и $d_{\text{экв}}$ – см. пояснения к рисунку 21 (раздел 3.2).

2. Далее найдем количество удельного тепла, необходимое для отопления и кондиционирования здания, отнесенное к одному квадратному метру основания. При этом учтем, что $h_2 - h_1 = d_{\text{экв}}$ (см. рис. 26), а трубы коллектора имеют круглое сечение. Имеем:

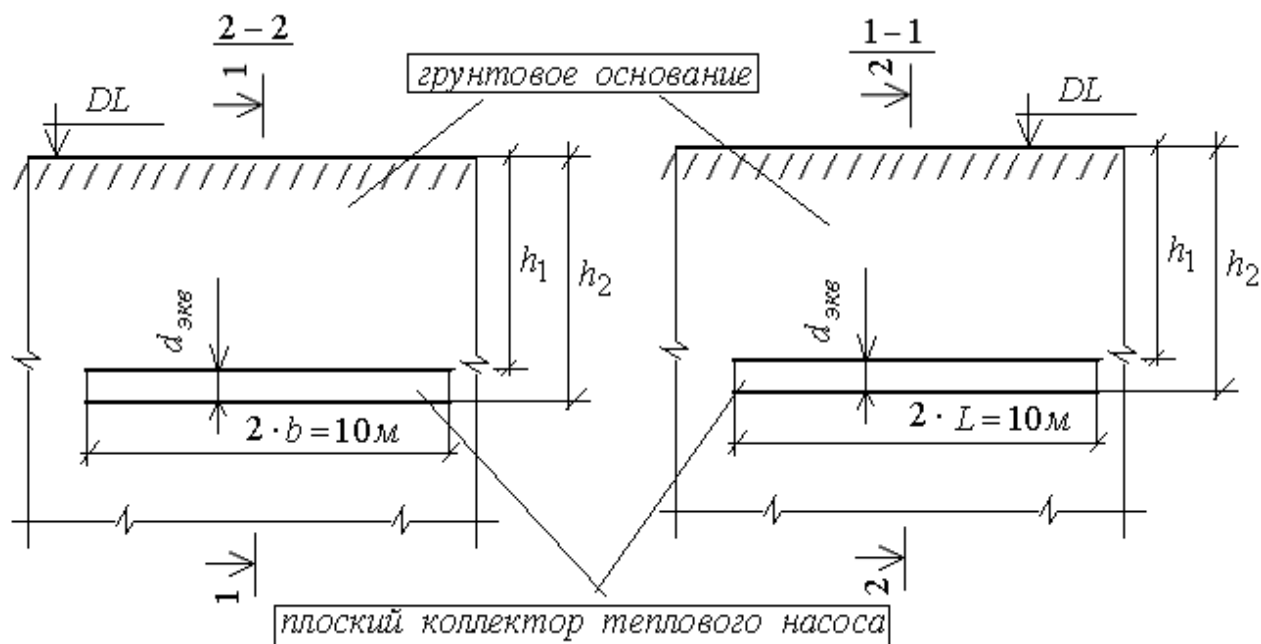


Рис. 26. К расчету температурного поля в основании плоского коллектора теплового насоса (схема).

$$q_w = \frac{Q \cdot P_{тр} \cdot 1м \cdot 0,707}{(h_2 - h_1) \cdot 1м \cdot 0,5м} = \frac{Q \cdot \pi \cdot (h_2 - h_1) \cdot 1м \cdot 0,707}{(h_2 - h_1) \cdot 1м \cdot 0,5м} =$$

$$= \frac{Q \cdot \pi \cdot 0,707}{0,5м} = \frac{20 \cdot 3,14 \cdot 0,707}{0,5} = 89 \frac{Вт}{м^3}$$

Здесь $P_{тр} = \pi \cdot d_{экв}$ – периметр эквивалентной трубы коллектора и $d_{экв} = h_2 - h_1$ – диаметр эквивалентной трубы коллектора и расчетная толщина объемного источника удельного тепла (рис. 26).

3. Потом следует определить коэффициенты температуропроводности основания a и произведение $\rho \cdot c_p$ [6, 14].

Имеем:

$$a = 0,58 \frac{м^2}{мес} \quad \text{и} \quad \rho \cdot c_p = 0,863 \frac{Вт \cdot мес}{м^3 \cdot град} \quad (\text{см. раздел 3.1}).$$

4. В соответствии с графиками отопления и кондиционирования имеем такую зависимость удельной энергии от времени:

$$\left. \begin{aligned}
 q_w(t) &= -89 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{если тепловой насос} \\
 &\text{работает в режиме отопления;} \\
 q_w(t) &= 89 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - \text{если тепловой насос} \\
 &\text{работает в режиме кондиционирования;} \\
 q_w(t) &= 89 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - 89 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{если} \\
 &\text{тепловой насос работает в режиме отопления и} \\
 &\text{кондиционирования одновременно.}
 \end{aligned} \right\}, \quad (71)$$

где t – время в месяцах.

5. Далее с использованием формулы (65) и принципа суперпозиции найдем температурное поле от прямоугольного в плане распределенного источника теплоты с размерами $2 \cdot b \times 2 \cdot L$ толщиной $\Delta = h_2 - h_1$. Для этого найдем дифференциал (65) и полученное таким образом выражение проинтегрируем в пределах $x \in (-b, b)$, $y \in (-L, L)$ и $z \in (h_1, h_2)$ Имеем:

$$\left. \begin{aligned}
 dT(r, z, t) &= \int_{-b-L}^b \int_{-L}^L \left\langle \int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau \right\rangle dx_1 \cdot dy_1 \cdot d\xi; \\
 f_0 &= \exp \left[-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)} \right];
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \exp\left[-\frac{(z-\xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right]; \\ f_2 &= \exp\left[-\frac{(z+\xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right]; \\ k(t,\tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t-\tau)]^3}}. \end{aligned} \right\},$$

откуда

$$T(r,t) = \int_0^t k(\tau) \cdot (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \cdot (f_5 + f_6 + f_7 + f_8) d\tau;$$

$$f_1 = \operatorname{erf}\left(\frac{-b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{-L+y}{a_1}\right);$$

$$f_2 = -\operatorname{erf}\left(\frac{-b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{L+y}{a_1}\right);$$

$$f_3 = \operatorname{erf}\left(\frac{b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{-L+y}{a_1}\right);$$

$$f_4 = \operatorname{erf}\left(\frac{b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{L+y}{a_1}\right);$$

$$f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{-h_2+z}{a_1}\right);$$

$$f_6 = \operatorname{erf}\left(\frac{h_2+z}{a_1}\right);$$

(72)

$$\left. \begin{aligned}
 f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{-h_1 + z}{a_1}\right); \\
 f_8 &= \operatorname{erf}\left(\frac{h_1 + z}{a_1}\right); \\
 a_1 &= 2 \cdot \sqrt{a \cdot (t - \tau)}; \\
 k(\tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p}.
 \end{aligned} \right\} \quad (72)$$

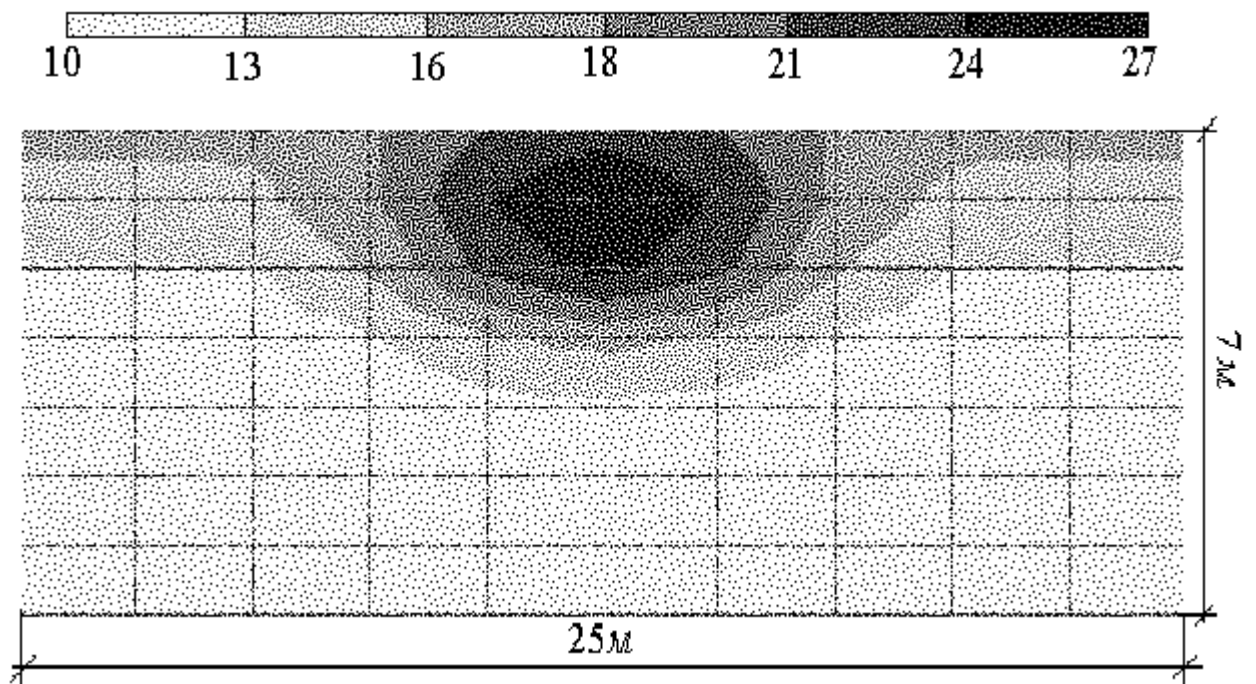


Рис. 27. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 1,1 метра после работы теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев

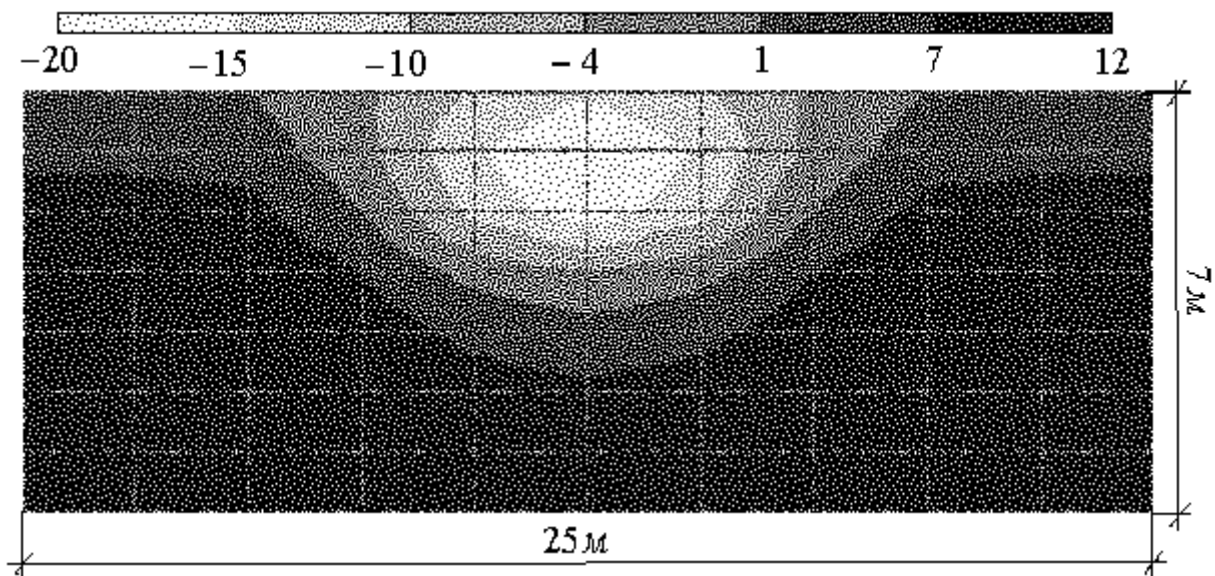


Рис. 28. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 1,1 метра после работы теплового насоса в режиме отопления в течение 6 месяцев

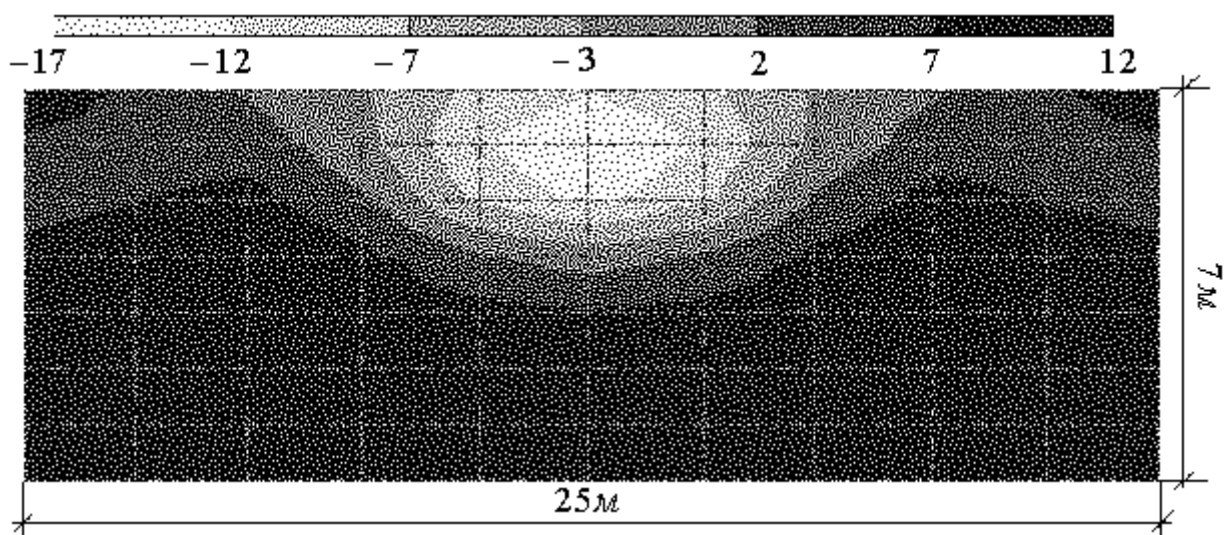


Рис. 29. Температурное поле в грунтовом основании на глубине 1,1 метра после работы теплового насоса в режиме кондиционирования 3 месяца и в режиме отопления в течение 6 месяцев

На основе полученных таким образом данных при $y=0$ нами были построены изополя температур в грунтовом основании для таких вариантов использования тепловых насосов:

–тепловой насос работает только лишь в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа (рис. 27);

–тепловой насос работает только лишь в режиме отопления шесть месяцев с начала ноября по конец марта (рис. 28);

–тепловой насос работает в реверсном режиме (т.е. в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа и в режиме отопления шесть месяцев– с начала ноября по конец марта (рис. 29).

Температура в основании определялась как сумма рассчитанных по формулам (13) и (72) температур. При этом для определения температуры на дневной поверхности основания была принята полученная нами аналитическая зависимость (5) и данные таблицы 8.

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между плоскими коллекторами тепловых насосов и грунтовыми основаниями (этот случай соответствует условиям пространственной задачи).

2. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может существенно отличаться от ее природных значений в (рис. 27).

3. Установлено, что при работе теплового насоса в режиме отопления температура основания может быть ниже температуры замерзания воды (рис. 28). Этот факт имеет важное значение в связи с явлением морозного пучения грунта [11].

4. Выявлено, что при функционировании теплового насоса в реверсном режиме имеет менее резкое изменение температурного поля

основания, чем это имеет место при его работе только лишь в режиме кондиционирования или только лишь в режиме отопления (рис. 29).

5. Показано, что при использовании в качестве теплообменника плоского коллектора теплообмен происходит в верхней, приповерхностной части основания (рис. 27, 28, 29). При этом в теплообмен включается находящаяся за пределами плоского коллектора часть основания (рис. 27, 28, 29). Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании фундаментов зданий и сооружений.

4.3. Температурное поле в основании U-образного коллектора теплового насоса конечных размеров

Рассмотрим задачу о распределении температурных полей в основании четырех U-образных коллекторов, длина которых равна 25 метров, работающего в режимах кондиционирования, отопления а также в реверсном режиме плоского теплового насоса (рис.30). В качестве исходных примем изложенные в разделе 3.1 данные.

Рассмотренный в настоящем разделе случай отличается от изложенного в разделе (3.1) по таким параметрам.

1. Поскольку в данном случае рассматриваются U-образные коллекторы конечной длины, мы имеем дело **не с плоской, а с пространственной** задачей.

2. Поскольку в данном случае температурное поле изменяется не только в плане, но и по глубине, то следует учитывать изменения температурного поля, обусловленные колебаниями температуры на дневной поверхности основания так, как это было сделано нами при выполнении изложенных в разделах 2.2 и 3.2 материалов исследований.

Таким образом в данном случае в качестве исходных следует принять представленные в разделе 3.1 данные.

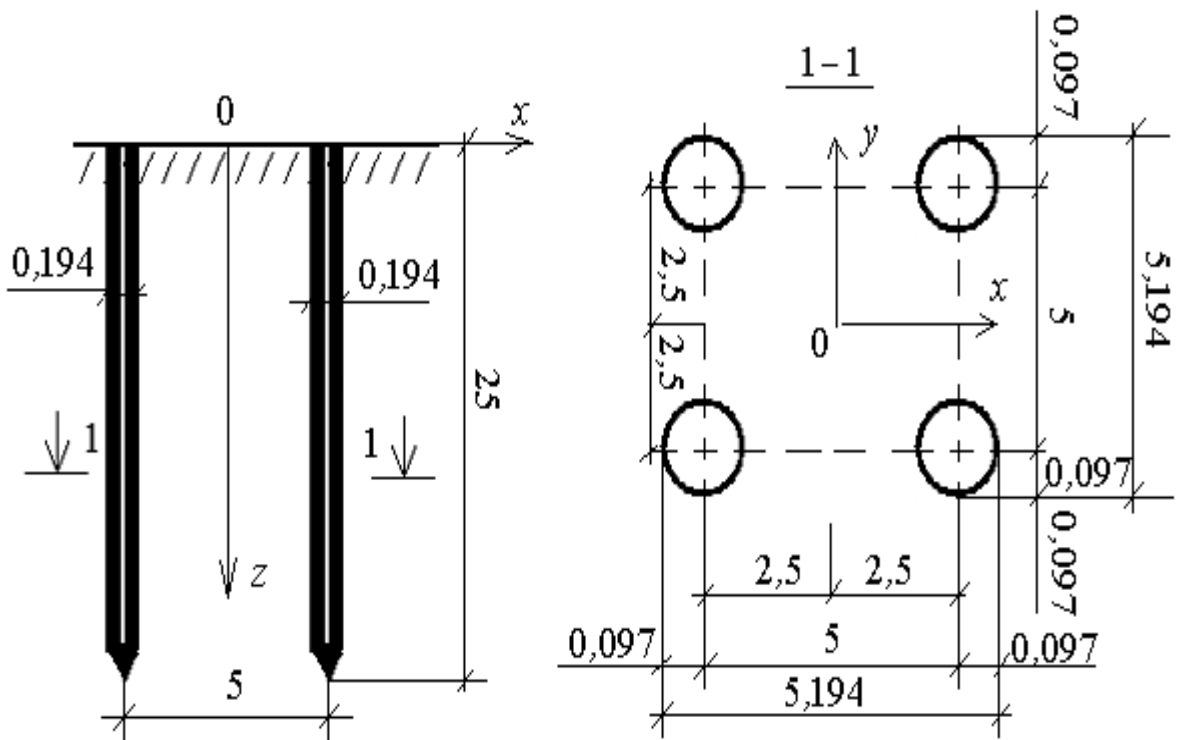


Рис. 30. К расчету теплового поля в основании четырех U-образных зондов

Примечание. Размеры даны в метрах.

Далее рассчитаем тепловое поле в грунтовом основании U-образного зонда длиной h и радиусом R . При этом не будем учитывать обусловленные природными условиями колебания температуры. В качестве фундаментального используем полученное нами решение (64).

Далее положим в (64) $dQ = q_w(\tau) \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\xi$, а вместо радиуса r подставим разность расстояний между радиусом r_1 , на расстоянии которого от центра находится рассматриваемая точка и радиусом r , на расстоянии которого от центра производится расчет температурного поля. После этого проинтегрируем полученное таким образом выражение в пределах $\xi \in (0, h)$ и $r_1 \in (0, R)$. Имеем:

$$\left.
\begin{aligned}
T_U(r, z, t) &= \int_0^h \left\langle \int_0^R \int_0^t \{k(\tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau\} \cdot r_1 \cdot dr_1 \right\rangle d\xi; \\
f_0 &= \exp \left[-\frac{(r - r_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
f_1 &= \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
f_2 &= \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
k(\tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{(\pi \cdot a \cdot t)^3}}.
\end{aligned}
\right\}$$

Выполнив процедуру интегрирования, найдем окончательно:

$$\left.
\begin{aligned}
T_U(r, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot [f_1 \cdot (f_2 + f_3) + f_4 \cdot (f_5 + f_6)] \cdot (f_6 + f_6 + f_6) d\tau; \\
f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \\
f_2 &= \exp \left(-\frac{r^2}{a_1} \right); \\
f_3 &= -\exp \left[-\frac{(R - r)^2}{a_1} \right];
\end{aligned}
\right\} \quad (73)$$

$$\left. \begin{aligned}
f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
f_5 &= \operatorname{erf} \left(\frac{r}{\sqrt{a_1}} \right); \\
f_6 &= \operatorname{erf} \left(\frac{R - r}{\sqrt{a_1}} \right); \\
f_7 &= -\operatorname{erf} \left(\frac{z - h}{\sqrt{a_1}} \right); \\
f_8 &= -\operatorname{erf} \left(\frac{z + h}{\sqrt{a_1}} \right); \\
f_9 &= \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{a_1}} \right); \\
a_1 &= 4 \cdot a \cdot (t - \tau) \\
k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}.
\end{aligned} \right\}. \tag{73}$$

Далее перейдем к декартовой системе координат. Для этого положим в (73) $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Имеем:

$$\left. \begin{aligned}
T_U(x, y, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot \left[\begin{aligned} &f_1 \cdot (f_2 + f_3) + \\ &+ f_4 \cdot (f_5 + f_6) \end{aligned} \right] \cdot (f_6 + f_6 + f_6) d\tau; \\
f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau);
\end{aligned} \right\}. \tag{74}$$

$$\left. \begin{aligned}
f_2 &= \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_1}\right); \\
f_3 &= -\exp\left[-\frac{\left(R - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2}{a_1}\right]; \\
f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
f_5 &= \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \\
f_6 &= \operatorname{erf}\left(\frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \\
f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z - h}{\sqrt{a_1}}\right); \\
f_8 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z + h}{\sqrt{a_1}}\right); \\
f_9 &= \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \\
a_1 &= 4 \cdot a \cdot (t - \tau) \\
k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}.
\end{aligned} \right\} \quad (74)$$

Температуру основания в расчетной точке основания с координатами (x, y, z) найдем как сумму

$$T(x, y, z, t) = T_U(x, y, z, t) + T(z, t). \quad (75)$$

Здесь $T_U(x, y, z, t)$ – температура в точке основания с координатами (x, y, z) в момент времени t , обусловленная теплообменом основания с

U -образным зондом (ее следует рассчитывать с использованием формул (74)), а $T(z,t)$ – температура на глубине z в момент времени t , обусловленная теплообменом основания с окружающей средой (ее следует рассчитывать с использованием формул (13)).

В ходе численного эксперимента нами были использованы зависимости удельной энергии U -образного зонда от времени (66).

На основе полученных таким образом данных при $y=0$ нами были построены изополя температур в грунтовом основании для таких вариантов использования тепловых насосов:

–тепловой насос работает только лишь в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа (рис. 31);

–тепловой насос работает только лишь в режиме отопления шесть месяцев с начала ноября по конец марта (рис. 32);

–тепловой насос работает в реверсном режиме (т.е. в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа и в режиме отопления – шесть месяцев с начала ноября по конец марта рис. 33).

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований, позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между U -образными зондами тепловых насосов и грунтовыми основаниями при учете сезонных изменений температуры на поверхности основания.

2. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может превышать ее природные сезонные значения (рис. 31).

3. Установлено, что при работе теплового насоса в режиме отопления температура основания может быть ниже температуры замерзания воды (рис. 32). Этот факт имеет важное значение при проектировании фундаментов и подземных сооружений в связи с явлением морозного пучения грунта [2,11].

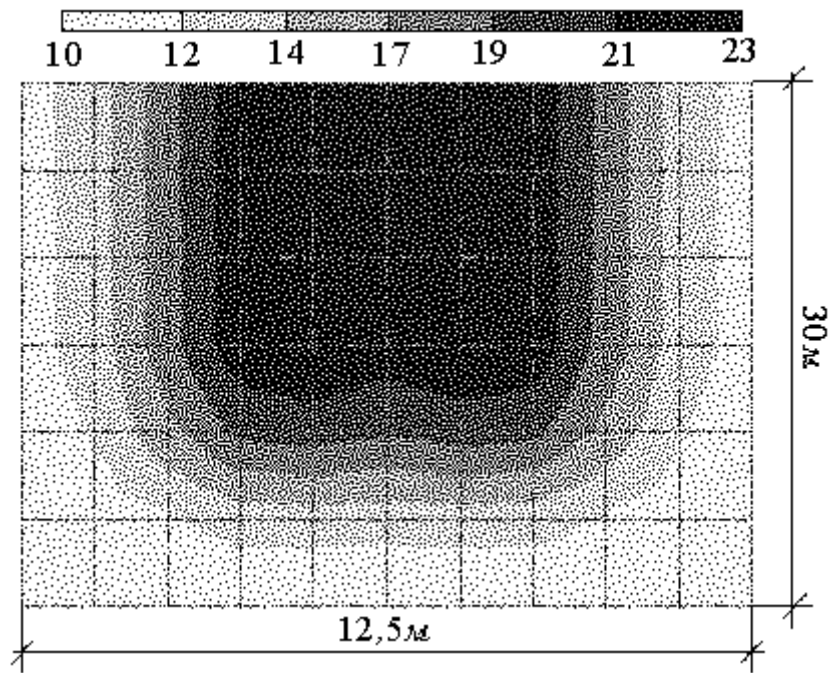


Рис. 31. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U -образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев

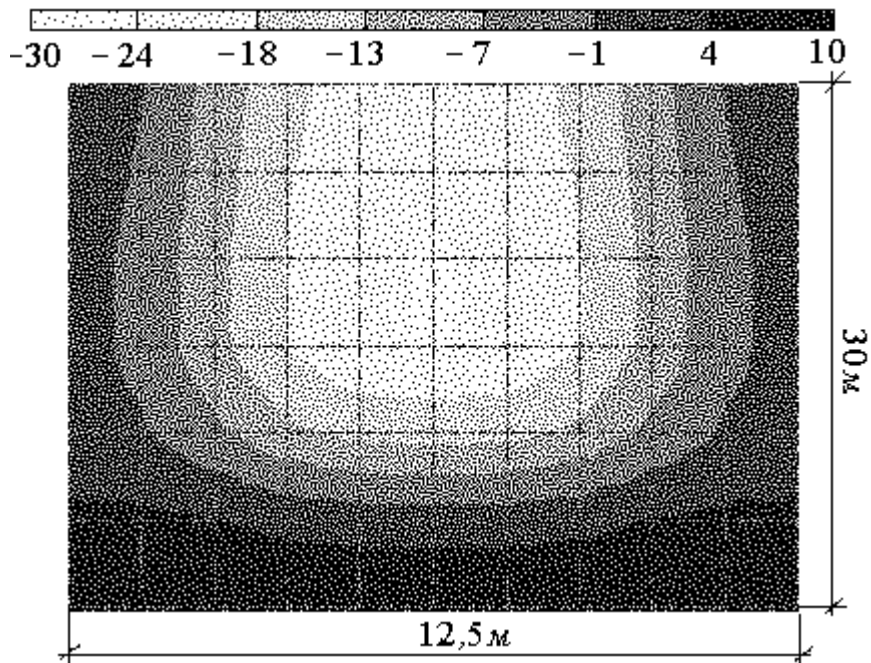


Рис. 32. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U -образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме отопления в течение 6 месяцев

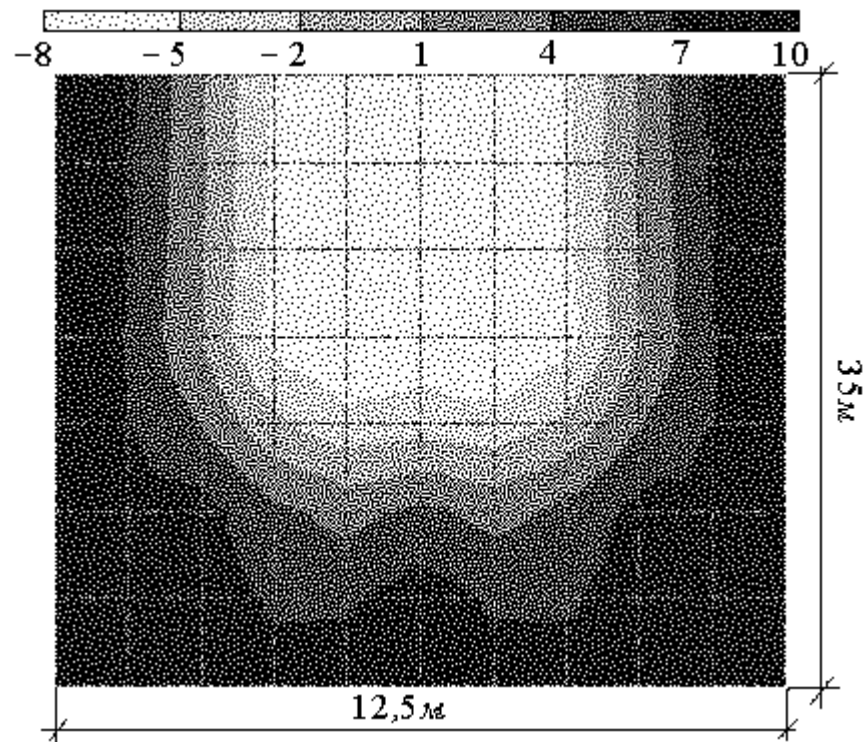


Рис. 33. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U -образных зондов с основанием при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев и в режиме отопления в течение 6 месяцев

4. Выявлено, что тепловые поля при работе теплового насоса в режиме отопления и в реверсном режиме отличаются друг от друга (рис. 32 и 33).

5. Установлено, что при функционировании U -образных зондов в теплообмен вовлекаются значительные объемы грунта. Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

4.4. Обсуждение результатов исследований. Выводы по разделу

Изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. Разработаны методики расчета температурных полей,

возникших в результате теплообмена между коллекторами тепловых насосов и грунтовыми основаниями при учете сезонных изменений температуры на поверхности основания. При этом были рассмотрены:

- U -образные зонды тепловых насосов на значительной глубине (плоская задача);
- плоские коллекторы тепловых насосов (пространственная задача);
- U -образные зонды тепловых насосов конечной длины (пространственная задача).

2. Показано, что при работе тепловых насосов в режиме отопления в грунтовых основаниях могут образовываться области с отрицательной температурой. Этот факт необходимо учитывать при проектировании оснований зданий и сооружений ввиду возможности проявления деформаций морозного пучения. Кроме того, это явление представляет проблему с точки зрения экологии.

3. Показано, что при работе тепловых насосов в режиме отопления в грунтовых основаниях могут образовываться области с повышенной температурой. Это явление представляет интерес с точки зрения экологии.

4. При работе тепловых насосов в реверсном режиме разность граничных температур значительно меньше, чем это имеет место при их работе только лишь в режиме отопления или только лишь в режиме кондиционирования. Это свидетельствует о том, что в данном случае при работе теплового насоса отопления частично используются накопленные ранее произведенные им тепло и холод. Иными словами, при работе теплового насоса в реверсном режиме возрастает его КПД.

В заключение уместно отметить, что представленные в настоящем разделе картины температурных полей отображают экстремальную ситуацию, поскольку они соответствуют случаям максимально возможного отбора тепла из основания в течение всего отопительного сезона и наоборот – максимально возможной его «закачке» в основание в течение всего сезона кондиционирования.