

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 624.139

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ
“РЕЗЕРВУАР С НЕФТЬЮ – СЕЗОННОЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО”

Г.М. Долгих, С.Н. Окунев, Г.В. Аникин*, К.А. Спасенникова*

ООО НПО “Фундаментстройаркос”, 625014, Тюмень, ул. Новаторов, 12, Россия; fsa@npf-fsa.ru

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; anikin@ikz.ru

Представлен численный расчет нестационарных температурных полей. Рассмотрена динамика работы системы горизонтального охлаждения резервуара типа “ГЕТ”. Расчеты выполнены на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра по программе “Термополе 3D”. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных и показано, что программа “Термополе 3D” может быть использована для дальнейших расчетов температурных полей в грунтах.

Термостабилизация, грунт, температурное поле, система охлаждения

NUMERICAL CALCULATION OF UNSTEADY TEMPERATURE FIELDS
IN THE SYSTEM “OIL TANK – SEASONAL COOLING DEVICE”

G.M. Dolgich, S.N. Okunev, G.V. Anikin*, K.A. Spasennikova*

ООО NPO “Fundamentstroyarkos”, 625014, Tyumen, Novatorov st., 12, Russia; fsa@npf-fsa.ru

*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; anikin@ikz.ru

The numerical calculation of unsteady temperature fields has been presented. The dynamics of work of the system with horizontal cooling of oil reservoir has been considered. The calculation was performed using the supercomputer NKS-30T in the Siberian Supercomputer Center (program “Termopole 3D”). Also the calculated and theoretical data were compared. The comparison has demonstrated that the calculated data and thermometric monitoring are in good agreement.

Thermal stabilization, soil, temperature field, cooling system

Ранее авторами были получены аналитические выражения для расчета стационарных температурных полей систем термостабилизаторов, позволяющие рассчитать все необходимые характеристики процесса термостабилизации фундамента под резервуаром с нефтью [Аникин и др., 2011а].

В ходе данной работы выполнен численный расчет нестационарных температурных полей и рассмотрено функционирование системы горизонтального охлаждения резервуара типа “ГЕТ” (горизонтальная естественно действующая трубчатая система) [Долгих и др., 2008]. Температура нефти в резервуаре была принята равной температуре атмосферы, так как резервуар пустой, без нефти. Теплообмен между грунтом и хладагентом рассчитан в соответствии с методикой, изложенной в работе [Аникин и др., 2011б]. Система охлаж-

дения состояла из четырех конденсаторных блоков с площадью оребрения 100 м^2 каждый, поднятых на высоту 3,83 м относительно труб испарителей. Трубы испарителей покрывали площадь круга диаметром 32 м, расстояние между трубами испарительной системы составляло 0,8 м. Диаметр резервуара 22,8 м. Под резервуаром находился слой пеноплекса толщиной 200 мм. План размещения системы температурной стабилизации в основании резервуара РВС-5000 на ЦПС-2 Уренгойского месторождения приведен на рис. 1.

Климатические данные по Уренгою взяты с сайта расписания погоды [www.rp5.ru]. Вычисления выполнены для среднемесячных значений температуры (t_a) и скорости ветра (v), которые представлены в табл. 1.

Расчеты проведены с начала сентября 1989 г. по конец мая 1990 г. Для расчета тепломассопере-

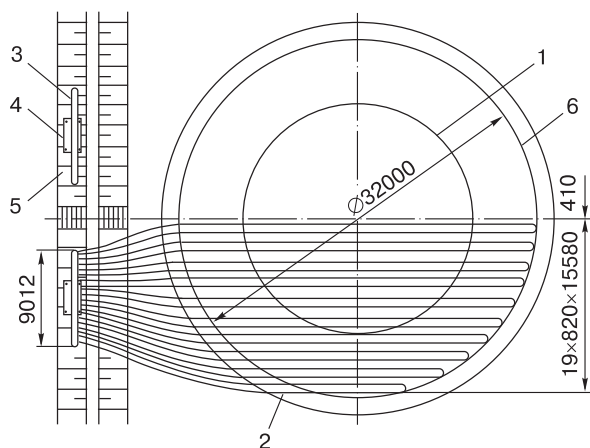


Рис. 1. План размещения системы температурной стабилизации в основании резервуара РВС-5000 на ЦПС-2 Уренгойского месторождения.

1 – резервуар РВС-5000; 2 – полиэтиленовые трубки; 3 – коллектор; 4 – конденсатор; 5 – воздушные термосваи; 6 – борма.

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры атмосферы (t_a) и скорости ветра (v) на Уренгойском месторождении

| Месяц, год | $t_a, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | Месяц, год | $t_a, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ |
|---------------|-----------------------|-----------------|-------------|-----------------------|-----------------|
| Сентябрь 1989 | 8,1 | 4,1 | Март 1990 | -17,1 | 5,0 |
| Октябрь 1989 | -16,6 | 5,3 | Апрель 1990 | -2,9 | 7,5 |
| Ноябрь 1989 | -18,0 | 5,0 | Май 1990 | -2,1 | 5,0 |
| Декабрь 1989 | -23,7 | 3,8 | Июнь 1990 | 12,8 | 3,7 |
| Январь 1990 | -25,5 | 4,9 | Июль 1990 | 24,0 | 3,6 |
| Февраль 1990 | -25,1 | 3,8 | Август 1990 | 12,9 | 3,3 |

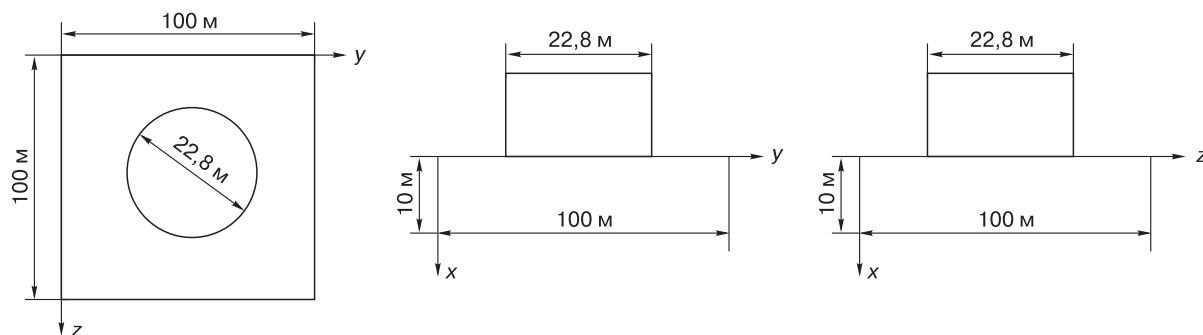


Рис. 2. Геометрические характеристики расчетной области в координатных плоскостях (y, z), (x, y), (x, z) соответственно.

носа в грунте применялся метод эффективной теплоемкости [Самарский, 2003], в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в виде

$$\left[c + L\delta(T - T_f) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c – объемная теплоемкость грунта; λ – коэффициент теплопроводности грунта; T – температура; T_f – температура фазового перехода; x, y, z – декартовы координаты; t – время; $\delta(T - T_f)$ – дельта-функция Дирака. Величина L задается выражением

$$L = r(w - w_{\text{нв}})\gamma_{\text{ск}}, \quad (2)$$

где r – удельная теплота плавления льда; w – влажность грунта; $w_{\text{нв}}$ – влажность незамерзшей воды; $\gamma_{\text{ск}}$ – объемная плотность скелета.

Расчетная область изображена на рис. 2. Сетка пространственных координат в расчетной области задается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_i &= ih_x, & 0 \leq i \leq 100, & & h_x &= 0,1 \text{ м}; \\ y_j &= jh_y, & 0 \leq j \leq 1001, & & h_y &= 0,1 \text{ м}; \\ z_k &= kh_z, & 0 \leq k \leq 101, & & h_z &= 1 \text{ м}; \\ t_n &= \tau n, & 0 \leq n \leq \frac{T_{\text{max}}}{\tau}, & & \tau &= 0,01 \text{ сут}, \end{aligned}$$

где T_{max} – конечное время, при котором определяется температурное поле.

Таблица 2.

Показания термометрических датчиков кос

| Номер датчика | Коса № 369 | | Коса № 366 | | Коса № 368 | | Коса № 365 | |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $t_{\text{теор}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{теор}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{теор}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{теор}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$ |
| <i>Дата показаний 21 января 1990 г.</i> | | | | | | | | |
| 1 | -3,22 | -2,90 | -17,27 | -19,63 | 0,09 | -2,37 | -8,20 | -19,45 |
| 2 | -8,02 | -12,47 | -17,16 | -17,62 | -1,19 | -4,58 | -8,19 | -10,04 |
| 3 | -16,47 | -18,60 | -16,64 | -16,24 | -7,83 | -10,10 | -7,99 | -8,86 |
| 4 | -15,91 | -17,37 | -16,07 | -15,60 | -7,83 | -9,63 | -7,83 | -8,85 |
| 5 | -15,90 | -16,80 | -16,06 | -16,43 | -7,81 | -8,50 | -7,81 | -8,71 |
| 6 | -15,90 | -16,56 | -16,06 | -16,59 | -7,81 | -8,54 | -7,81 | -8,69 |
| 7 | -15,90 | -16,66 | -16,06 | -15,52 | -7,81 | -8,16 | -7,81 | -8,78 |
| 8 | -15,91 | -16,58 | -16,07 | -17,10 | -7,83 | -9,03 | -7,82 | -8,67 |
| 9 | -16,42 | -17,29 | -16,60 | -16,09 | -7,85 | -9,74 | -7,84 | -8,96 |
| 10 | -9,06 | -15,02 | -13,14 | -7,53 | -2,11 | -8,35 | -2,89 | -4,96 |
| 11 | -3,23 | -12,32 | -3,26 | -3,86 | 0,09 | -4,15 | 0,09 | -4,52 |
| <i>Дата показаний 20 марта 1990 г.</i> | | | | | | | | |
| 1 | -2,70 | -6,73 | -14,84 | -16,17 | 0,008 | -4,73 | -11,23 | -16,11 |
| 2 | -9,42 | -11,26 | -14,86 | -15,48 | -5,97 | -7,24 | -11,38 | -11,83 |
| 3 | -14,60 | -15,54 | -14,70 | -15,17 | -10,83 | -10,91 | -11,25 | -11,63 |
| 4 | -14,25 | -14,80 | -14,28 | -14,56 | -11,05 | -11,24 | -11,07 | -11,49 |
| 5 | -14,24 | -15,19 | -14,28 | -15,07 | -11,05 | -11,06 | -11,05 | -11,23 |
| 6 | -14,24 | -15,17 | -14,28 | -14,95 | -11,05 | -11,30 | -11,05 | -11,34 |
| 7 | -14,24 | -15,15 | -14,28 | -15,02 | -11,05 | -10,74 | -11,05 | -11,30 |
| 8 | -14,25 | -14,88 | -14,28 | -14,98 | -11,05 | -11,40 | -11,05 | -11,31 |
| 9 | -14,57 | -14,82 | -14,61 | -14,49 | -10,88 | -11,03 | -10,85 | -10,92 |
| 10 | -10,13 | -12,96 | -12,01 | -8,70 | -6,46 | -9,52 | -6,60 | -8,22 |
| 11 | -2,77 | -10,69 | -2,82 | -4,68 | 0,007 | -7,12 | 0,003 | -5,65 |
| <i>Дата показаний 20 апреля 1990 г.</i> | | | | | | | | |
| 1 | -1,82 | -3,28 | -11,74 | -10,32 | -0,13 | -1,96 | -10,33 | -10,51 |
| 2 | -7,39 | -8,72 | -12,00 | -11,07 | -5,97 | -7,59 | -10,59 | -10,88 |
| 3 | -11,58 | -11,58 | -12,00 | -11,68 | -9,92 | -10,30 | -10,50 | -10,96 |
| 4 | -11,59 | -11,46 | -11,61 | -11,63 | -10,25 | -10,67 | -10,28 | -10,93 |
| 5 | -11,58 | -11,61 | -11,58 | -11,80 | -10,25 | -10,64 | -10,25 | -10,82 |
| 6 | -11,58 | -11,89 | -11,58 | -11,93 | -10,25 | -10,91 | -10,25 | -10,93 |
| 7 | -11,58 | -11,85 | -11,58 | -11,95 | -10,25 | -10,28 | -10,25 | -10,96 |
| 8 | -11,59 | -11,63 | -11,58 | -11,72 | -10,25 | -10,88 | -10,24 | -10,86 |
| 9 | -11,61 | -11,13 | -11,58 | -11,15 | -9,97 | -10,43 | -9,93 | -10,40 |
| 10 | -7,77 | -8,94 | -7,69 | -8,61 | -6,30 | -9,31 | -6,25 | -8,40 |
| 11 | -1,92 | -6,04 | -1,93 | -5,51 | -0,15 | -6,55 | -0,18 | -6,33 |

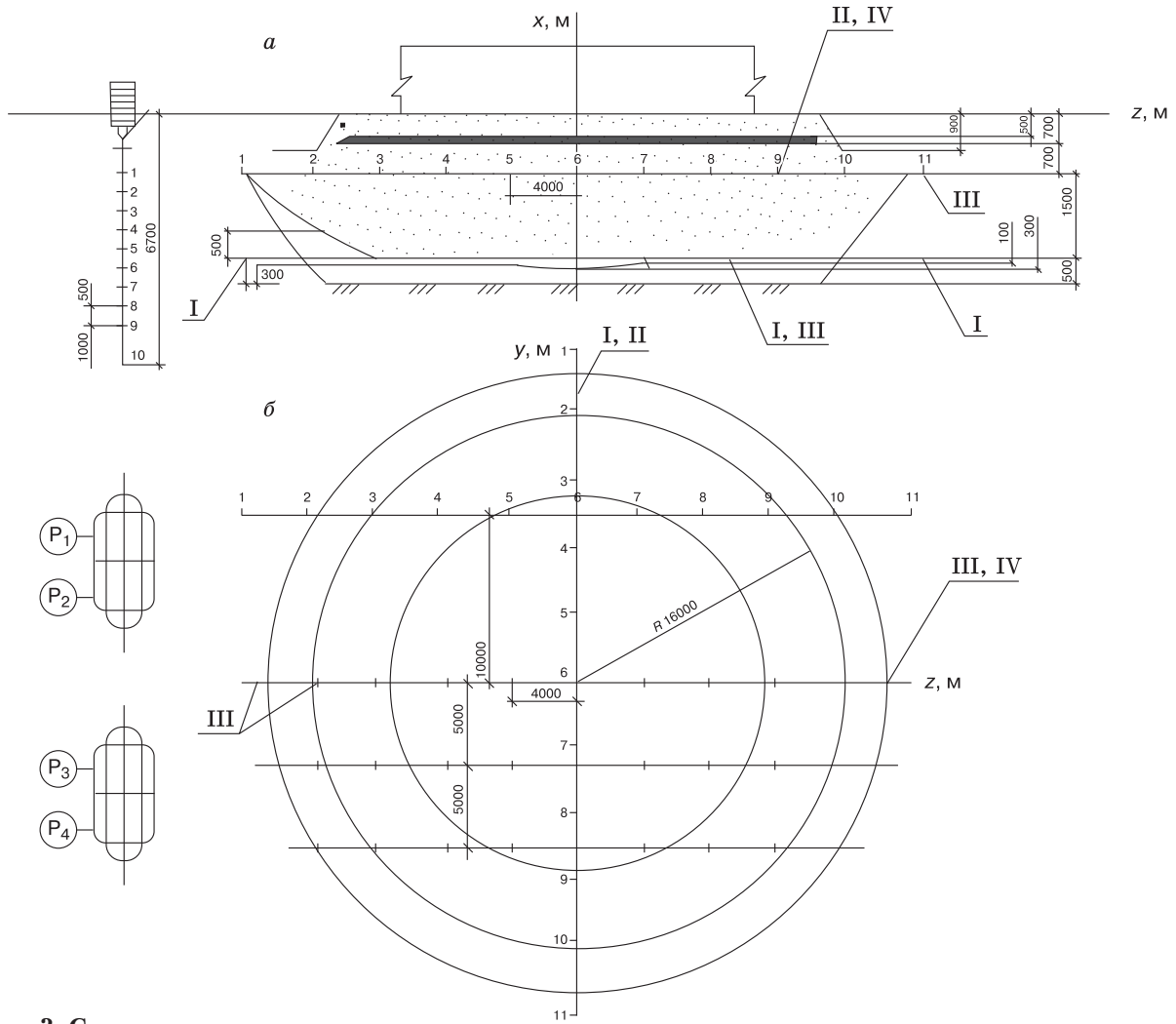


Рис. 3. Схема размещения кос.

a – вид сбоку; *б* – вид сверху; I – коса № 368, II – коса № 369, III – коса № 365, IV – коса № 366; P₁, P₂, P₃, P₄ – конденсаторные блоки.

Трубы испарительной системы расположены параллельно оси *z*. Разностная схема, соответствующая уравнению (1), записывается в виде

$$\begin{aligned}
 T(i, j, k, n+1) = & T(i, j, k, n) + \\
 & + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_x^2} [T(i+1, j, k, n) + \\
 & + T(i-1, j, k, n) - 2T(i, j, k, n)] + \\
 & + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_y^2} [T(i, j+1, k, n) + \\
 & + T(i, j-1, k, n) - 2T(i, j, k, n)] + \\
 & + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_z^2} [T(i, j, k+1, n) + \\
 & + T(i, j, k-1, n) - 2T(i, j, k, n)],
 \end{aligned}$$

где

$$a(i, j, k) = \begin{cases} a_m, & T(i, j, k, n) < T_f - \Delta, \\ 0,5(\lambda_m + \lambda_r), & T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta, \\ a_r, & T(i, j, k, n) > T_f + \Delta. \end{cases}$$

(3)

Здесь a_r , a_m – температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно; λ_r , λ_m – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта; c_r , c_m – удельные теплоемкости талого и мерзлого грунта. Величина Δ определяет в методе эффективной теплоемкости [Самарский, 2003] диапазон температур, при которых идет фазовый переход, а именно $T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta$. При расчете $a(i, j, k)$ дельта-функция Дирака в (1) заменена на

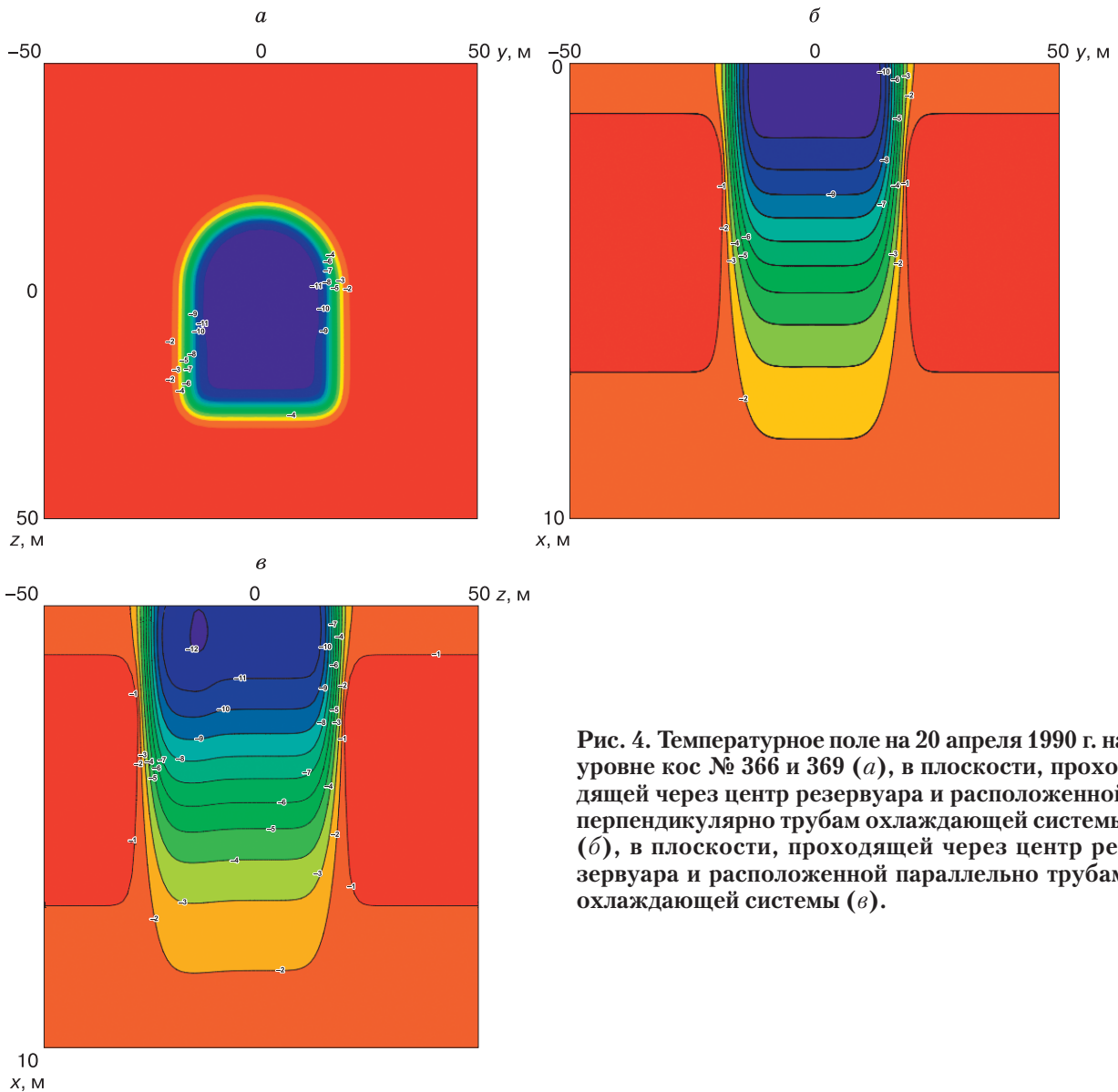


Рис. 4. Температурное поле на 20 апреля 1990 г. на уровне кос № 366 и 369 (а), в плоскости, проходящей через центр резервуара и расположенной перпендикулярно трубам охлаждающей системы (б), в плоскости, проходящей через центр резервуара и расположенной параллельно трубам охлаждающей системы (в).

функцию $f(T - T_f)$, заданную следующими выражениями [Самарский, 2003]:

$$f(T - T_f) = \begin{cases} 0, & |T - T_f| > \Delta, \\ \frac{1}{2\Delta}, & |T - T_f| \leq \Delta. \end{cases}$$

На боковых поверхностях расчетной области принималось граничное условие второго рода с тепловым потоком, равным нулю. На нижней границе расчетной области принималось граничное условие первого рода с температурой, равной начальной температуре, на верхней границе расчетной области принималось граничное условие третьего рода, причем в той части, которая находится под резервуаром, учитывался теплообмен с резер-

вуаром, в остальной части границы расчетной области учитывался теплообмен с атмосферой. Начальная температура грунта принималась равной $0,3^\circ\text{C}$ до глубины $2,6\text{ м}$ от нижней кромки термоизоляции и $-1,5^\circ\text{C}$ на больших глубинах. Параметры грунта до глубины $2,6\text{ м}$ от нижней кромки термоизоляции приняты следующими: $\lambda_M = 2,51\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $\lambda_T = 2,18\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $c_M = 2188\text{ кДж}/\text{м}^3$, $c_T = 2761\text{ кДж}/\text{м}^3$, $\gamma_{\text{СК}} = 1620\text{ кг}/\text{м}^3$, $(w - w_{\text{НВ}}) = 0,17$. На больших глубинах приняты параметры грунта: $\lambda_M = 1,71\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $\lambda_T = 1,57\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $c_M = 2343\text{ кДж}/\text{м}^3$, $c_T = 3347\text{ кДж}/\text{м}^3$, $\gamma_{\text{СК}} = 1334\text{ кг}/\text{м}^3$, $(w - w_{\text{НВ}}) = 0,25$.

Для расчета температурных полей были взяты данные четырех кос (№ 365, 366, 368, 369) с термометрическими датчиками, расположенными

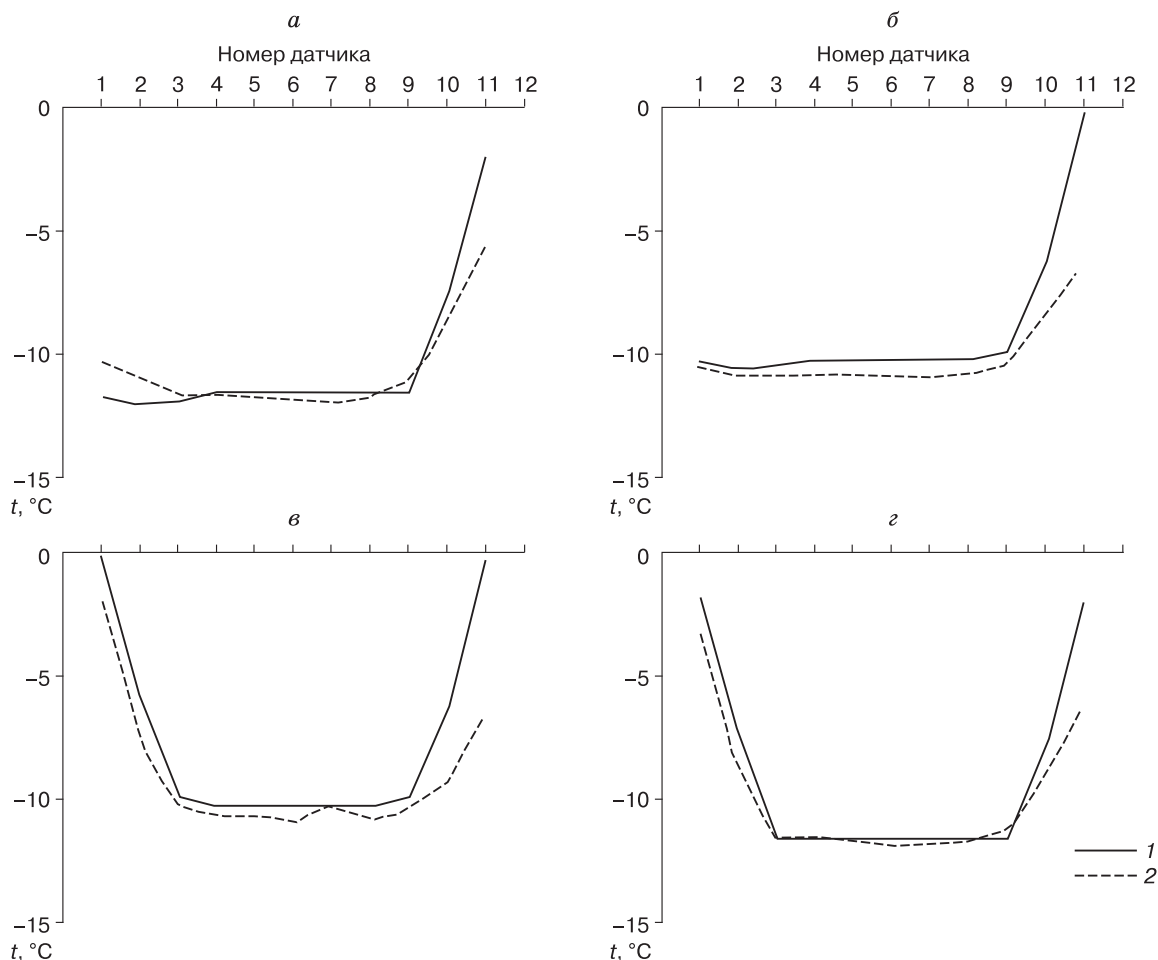


Рис. 5. Значения температуры для кос с термометрическими датчиками.

a – коса № 366; *б* – коса № 365; *в* – коса № 368; *г* – коса № 369; I – теоретические значения температуры; II – показания термодатчиков.

под резервуаром. В табл. 2 приведены теоретические и экспериментальные показания этих датчиков. На рис. 3 представлена схема расположения датчиков. Расчеты выполнены на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра с помощью программы “Термополе 3D”.

Было проведено сравнение теоретических значений температуры для кос и реальных показаний термодатчиков кос. На рис. 4 даны изображения термополей под резервуаром. На рис. 5 приведены теоретические данные и реальные показания термодатчиков. Расстояние между датчиками составляло 4 м.

Из анализа рисунков следует, что теоретические данные согласуются с экспериментальными результатами. Таким образом, программа “Термополе 3D” может быть использована для дальнейших расчетов температурных полей в грунтах.

Литература

- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А.** Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011а, т. XV, № 1, с. 33–39.
- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А.** Стационарные температурные поля в системе “емкость с нефтью–термостабилизаторы грунта” // Криосфера Земли, 2011б, т. XV, № 2, с. 29–33.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклисов В.Н.** Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, 2008, с. 34–39.
- Самарский А.А.** Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

Поступила в редакцию
10 июня 2012 г.