

## СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ “ГЕТ” НА ПРИМЕРЕ ПОЖАРНОГО ДЕПО ВАНКОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

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

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

\*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; anikin@ikz.ru

\*\*ЗАО “Ванкорнефть”, 660049, Красноярск, ул. 78 Добровольческой бригады, 15, Россия; kvzalesskiy@vankoroil.ru

Проведено численное моделирование работы горизонтальной системы температурной стабилизации грунтов “ГЕТ”. Моделирование выполнено на примере здания пожарного депо, построенного на Ванкорском нефтегазовом месторождении. Результаты моделирования совпадают с данными термометрического мониторинга, что подтверждает эффективность работы систем “ГЕТ”.

*Температурное поле, грунт, термостабилизация, испаритель, система охлаждения*

### COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELLING DATA OF THE WORK OF “GET” COOLING SYSTEM ON THE EXAMPLE OF FIRE DEPOT OF THE VANKORSKY FIELD

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

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

\*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, Malygina str., 86, Russia; anikin@ikz.ru

\*\*ZAO “Vankorneft”, 660049, Krasnoyarsk, 78 Dobrovolcheskoy brigady str., 15, Russia; kvzalesskiy@vankoroil.ru

The numerical modelling of the work of “GET” system (horizontal system of soil temperature stabilization) has been accomplished on the example of the Fire depot building constructed on the Vankorsky oil-and-gas field. The results of modelling coincide with the data of thermometric monitoring, which confirms the overall efficiency of “GET” systems.

*Temperature field, soil, thermostabilization, evaporator, cooling system*

В последние годы нефтедобыча все больше смещается в районы Крайнего Севера, для которых характерны вечномёрзлые грунты. Для температурной стабилизации вечномёрзлых грунтов оснований широкое распространение получают горизонтальные естественно действующие трубчатые системы “ГЕТ” производства НПО “Фундаментстройаркос” [Долгих и др., 2008]. В частности, такие системы были установлены для температурной стабилизации грунтов под зданием пожарного депо на Ванкорском нефтегазовом месторождении. Испаритель системы “ГЕТ” представляет собой совокупность параллельных горизонтальных труб, расположенных в грунте и заполненных жидким хладагентом. Конденсатор, соединенный с испарителем, находится в атмосфере. Когда температура атмосферы ниже температуры грунта, жидкий хладагент в испарителе начинает кипеть, а образовавшийся при этом пар поступает в конденсатор. В конденсаторе хладагент вновь переходит в жидкое состояние и стекает в испаритель под действием силы тяжести, обеспечивая эффективный теплообмен между грунтом и атмосферой. Общий вид системы “ГЕТ” приведен на рис. 1. Системы охлаждения были запущены в эксплуа-

тацию 17 июня 2008 г. и эксплуатируются до настоящего времени. Эффективность их работы на протяжении последних лет подтверждена термометрическим мониторингом, который проводился

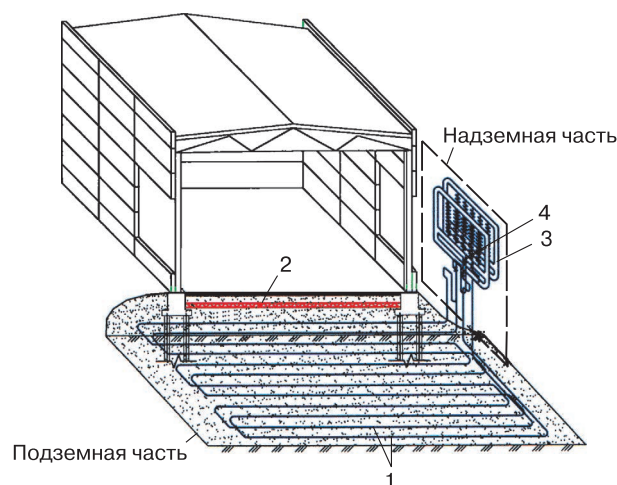


Рис. 1. Общий вид системы “ГЕТ”:

1 – охлаждающие трубы; 2 – теплоизоляция; 3 – конденсаторный блок; 4 – ускоритель циркуляции.

Таблица 1. Температуры грунта на глубине 2 м от поверхности пола в термометрических скважинах

Дата измерения	Температура грунта, °С			
	скв. 2	скв. 3	скв. 4	скв. 5
14.07.2010 г.	-1,30	-1,90	-1,00	-6,30
21.11.2010 г.	-1,19	-2,75	-2,44	-4,81
04.01.2011 г.	-6,31	-8,81	-8,88	-6,13
31.03.2012 г.	-6,83	-6,58	-6,77	-8,07

ЗАО “Ванкорнефть” и НПО “Фундаментстройаркос”. Температуры грунта на глубине 2 м от поверхности пола приведены в табл. 1.

В настоящей статье выполнен численный расчет нестационарных температурных полей и динамики работы системы горизонтального охлаждения “ГЕТ”. Для расчета тепломассопереноса в грунте применялся метод эффективной теплоемкости [Самарский, 2003; Аникин, Спасенникова, 2012], 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;  $\lambda$  – 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

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

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

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

$$\begin{aligned} T(i, j, k, n+1) = & T(i, j, k, n) + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_x^2} \times \\ & \times [T(i+1, j, k, n) + T(i-1, j, k, n) - 2T(i, j, k, n)] + \\ & + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_y^2} [T(i, j+1, k, n) + T(i, j-1, k, n) - 2T(i, j, k, n)] + \\ & + \frac{a(i, j, k)\tau}{h_z^2} [T(i, j, k+1, n) + T(i, j, k-1, n) - 2T(i, j, k, n)], \quad (3) \end{aligned}$$

где

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

Здесь  $a_t, a_m$  – температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно;  $\lambda_t, \lambda_m$  – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта;  $C_t, C_m$  – объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта;  $h_x, h_y, h_z$  – величины шагов по соответствующим координатам;  $\tau$  – шаг по времени. Величина  $\Delta$  в методе эффективной теплоемкости [Самарский, 2003] определяет диапазон температур, при которых идет фазовый переход:  $T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta$ . При расчете  $a(i, j, k)$  дельта-функция Дирака в (1) заменена на 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 нулевым тепловым потоком. 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 границы, которая находится под зданием, учитывался теплообмен со зданием, а в другой части границы расчетной области учитывался теплообмен с атмосферой. Теплообмен внутри системы “ГЕТ” рассчитывался в соответствии с методикой, изложенной в работе [Аникин и др., 2011].

Система “ГЕТ” выполнена из шести стандартных конденсаторных блоков, которые подключены к горизонтальным трубам испарителей. Расстояние между трубами испарителей составляет 0,6 м. Между полом и трубами испарителей размещен слой теплоизоляции из пеноплекса толщиной 0,2 м. Здание пожарного депо имеет размеры в плане 46 × 24 м, а трубы испарителей размещены на участке 50 × 28 м. Нулевой цикл пожарного депо приведен на рис. 2. Расчетная область имеет размеры в плане 70 × 50 м, глубиной 15 м и приведена на рис. 3.

Расчеты производились с 26.05.2008 по 31.03.2012 г. Температура в начальный момент времени соответствовала температуре на 26.05.2008 г. в термоскважине ТТ5 (см. рис. 3, а). Так, на глубине до 3 м от нижней кромки пеноплекса начальная температура составляла -3 °С,

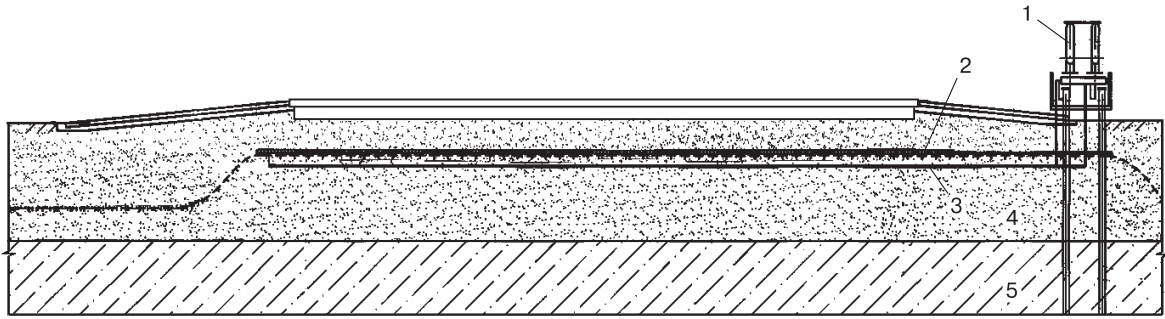


Рис. 2. Нулевой цикл пожарного депо:

1 – конденсатор "ГЕТ"; 2 – пеноплекс; 3 – охлаждающие трубы; 4 – слой насыпного песка толщиной 3 м; 5 – супесь.

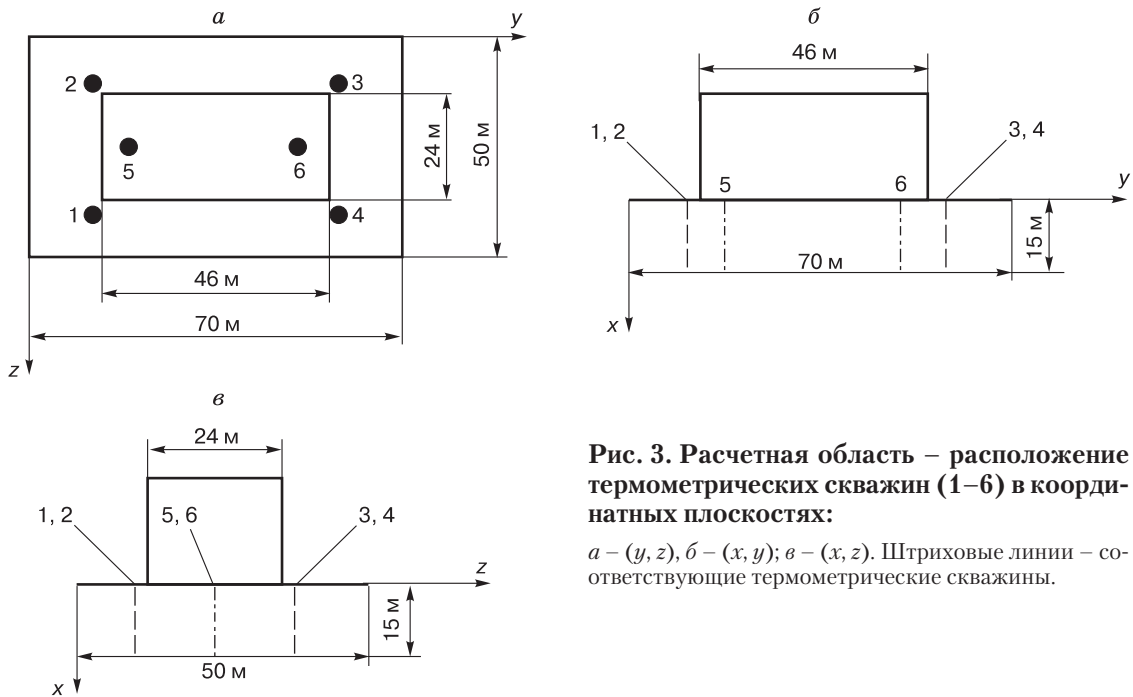


Рис. 3. Расчетная область – расположение термометрических скважин (1–6) в координатных плоскостях:

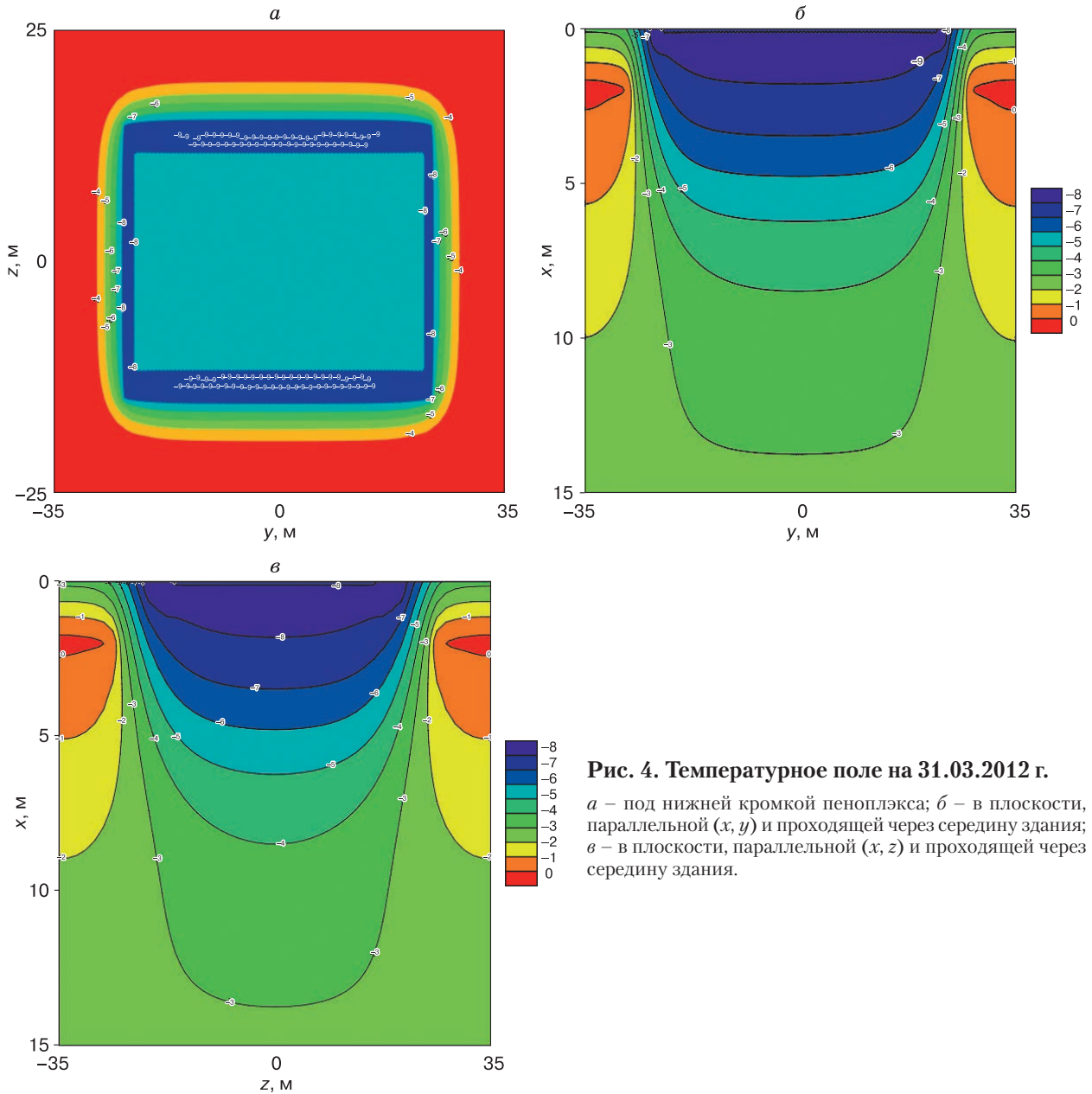
*a* – (*y*, *z*), *б* – (*x*, *y*); *в* – (*x*, *z*). Штриховые линии – соответствующие термометрические скважины.

Таблица 2. Теплофизические свойства насыпного грунта и супеси

Грунт	$\lambda_m$	$\lambda_T$	$C_m$	$C_T$	$w$	$\gamma_{скв}$ , кг/м <sup>3</sup>
	Вт/(м·К)		кДж/(К·м <sup>3</sup> )			
Насыпной грунт	2	1,81	2010	2470	0,15	1600
Супесь	1,91	1,81	2344	2813	0,24	1600

на глубине от 3 до 5 м она составляла  $-2^{\circ}\text{C}$ , на больших глубинах начальная температура составляла  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . Теплофизические свойства насыпного грунта и супеси (см. рис. 2) представлены в

табл. 2. Температурные поля, полученные при расчетах на 31.03.2012 г., приведены на рис. 4. Выполнено также сравнение данных термометрического мониторинга и расчетных (рис. 5).



**Рис. 4. Температурное поле на 31.03.2012 г.**

*а* – под нижней кромкой пеноплекса; *б* – в плоскости, параллельной  $(x, y)$  и проходящей через середину здания; *в* – в плоскости, параллельной  $(x, z)$  и проходящей через середину здания.

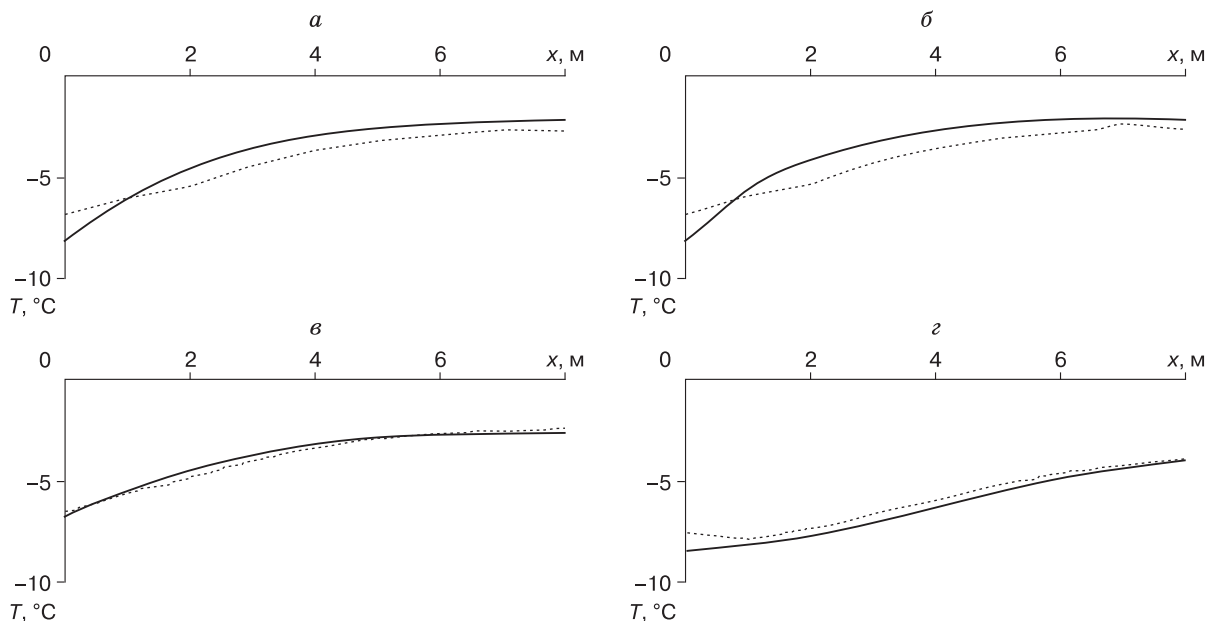
Расчет проводился на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра с помощью программного комплекса\*, получившего главную премию корпорации Intel 02.11.2012 г. в рамках конкурса прикладных разработок и исследований в области компьютерных технологий “Компьютерный континуум: от идеи до воплощения”, организованного Фондом развития инновационного центра “Сколково” и Intel.

Как видно из сравнения экспериментальных и расчетных значений температур грунтов ос-

нования здания пожарного депо, система “ГЕТ” обеспечивает температурную стабилизацию и несущую способность вечномёрзлых грунтов.

Из приведенных выше результатов вычислений следует, что разработанный метод позволяет рассчитывать достаточно большие массивы горной породы (в данном случае  $70 \times 50 \times 15$  м) с точностью до 0,1 м, что, в свою очередь, обеспечивает детальную картину температурного поля, даже если расстояние между трубами испарительной системы составляет 0,6 м. Именно такая дета-

\* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012611484. Arctica / Г.В. Аникин, С.Н. Плотников. Зарег. в реестре программ для ЭВМ 08.02.2012.



**Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных на 31.03.2012 г.**

$a$  – скважина 1;  $б$  – скважина 3;  $в$  – скважина 4;  $з$  – скважина 5. Сплошная линия – расчетные значения, пунктирная – данные термометрии;  $T$  – температура, °С;  $x$  – глубина, м.

лизация при достаточно больших объемах горной породы и является основным преимуществом данного метода по сравнению с другими. Как видно на рис. 5, разработанный метод расчета позволяет прогнозировать температурные поля с точностью до 1 °С.

### Литература

**Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А.** Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 33–39.

**Аникин Г.В., Спасенникова К.А.** Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 60–64.

**Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н.** Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномёрзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, НПО “ФСА”, 2008, с. 34–39.

**Самарский А.А.** Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

*Поступила в редакцию  
5 декабря 2012 г.*