

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ОТ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Ваганова Н.А.

E-mail: vna@imm.uran.ru

*Институт Математики и Механики
им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
Уральский федеральный
университет*

Екатеринбург – 2017

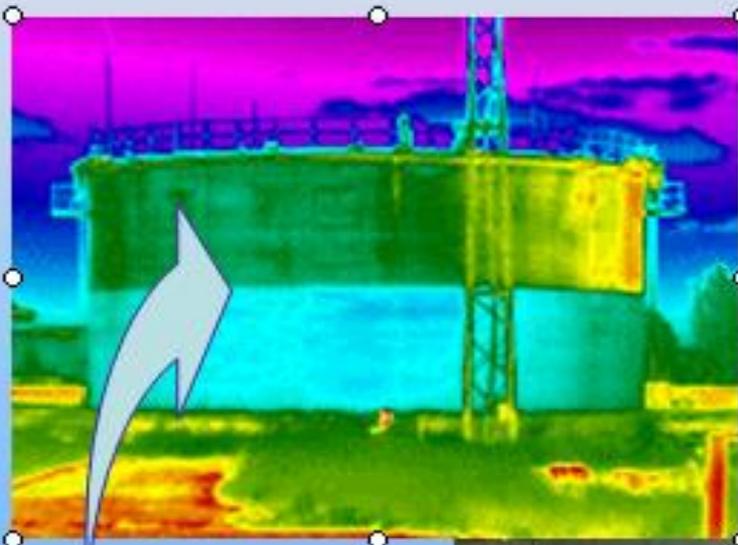
Литература

1. Ваганова Н.А. Численно-аналитическое моделирование нелинейных процессов для нестационарных задач механики сплошной среды // Диссертация канд. физ.-мат. Наук. Екатеринбург. 2007г.
2. *Vaganova N.A. Existence of a Solution of an Initial-Boundary Value Difference Problem for a Linear Heat Equation with a Nonlinear Boundary Condition // Proc. Steklov Inst. Math.- 2008.- Suppl. 1.- P. S260-S271. DOI:10.1134/S0081543808050209;*
3. Башуров, Вл.В., Н.А. Ваганова, Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 4. С. 3-18.
4. Vaganova N. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields // AIP Conf. Proc. 2014. Vol. 1631. P. 218-224. DOI: 10.1063/1.4902455.
5. Vaganova N.A. Simulation of thermal fields from an underground pipeline at the ground surface // AIP Conf. Proc.–2017.–Vol. 1910.–No. art. 020005. <https://doi.org/10.1063/1.5013942>

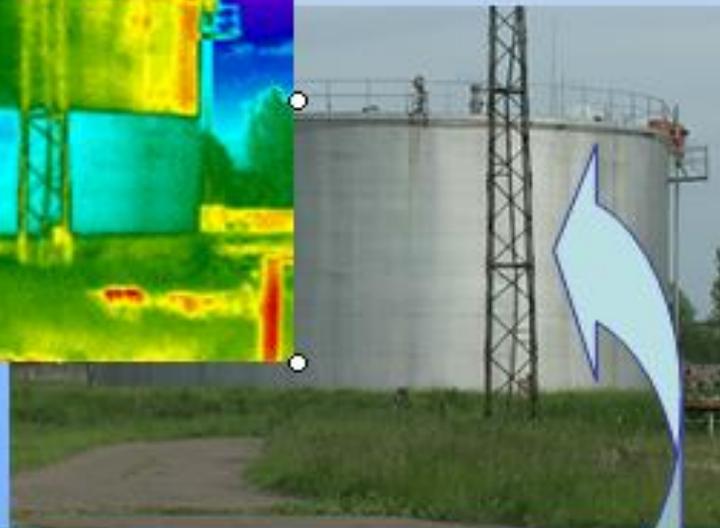
Аннотация

Одним из методов получения и исследования идеального теплового поля в различных средах является прямое численное моделирование процессов теплообмена с учетом важнейших физических факторов. Математическая модель распространения тепла от подземного источника описывается с учетом физических факторов, таких как фильтрация воды в почве и солнечная радиация. Тепловые процессы рассматриваются в трехмерном происхождении, где источником тепла является трубопровод с постоянной температурой и неоднородной изолированной оболочкой (с «повреждениями»). Эта задача приводит к решению уравнения теплопроводности с нелинейными граничными условиями. В работе рассматриваются методы и алгоритмы для моделирования тепловых полей в грунте, основанные на работах [1-5]. Представлены результаты численных расчетов и подходы к анализу тепловых полей на дневной поверхности.

Teplovisual methods of control



Teplovisual methods of control are very important problems.



Visual methods of control are essentially expensive.

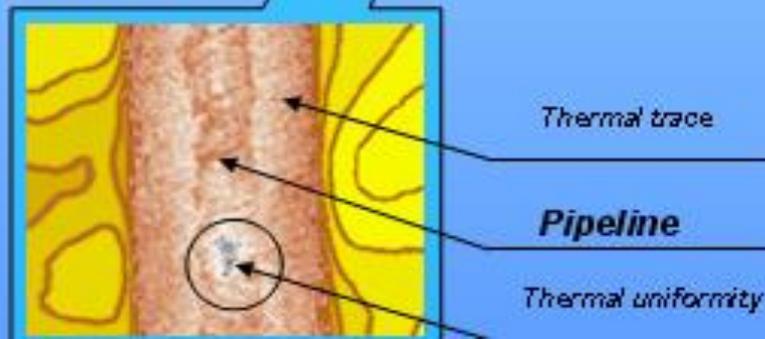
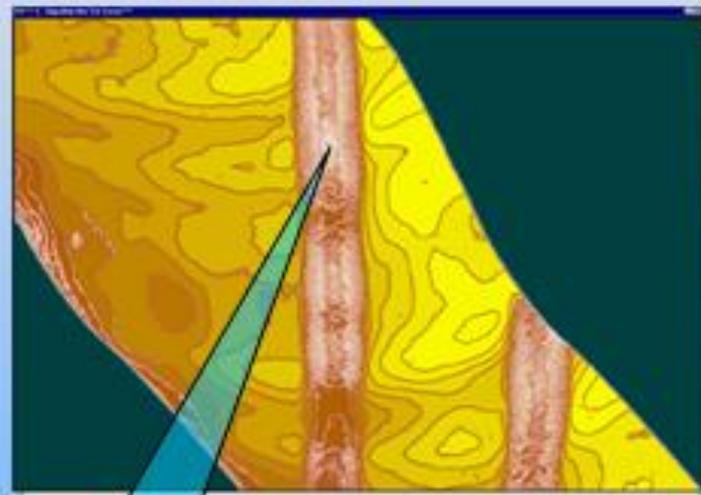
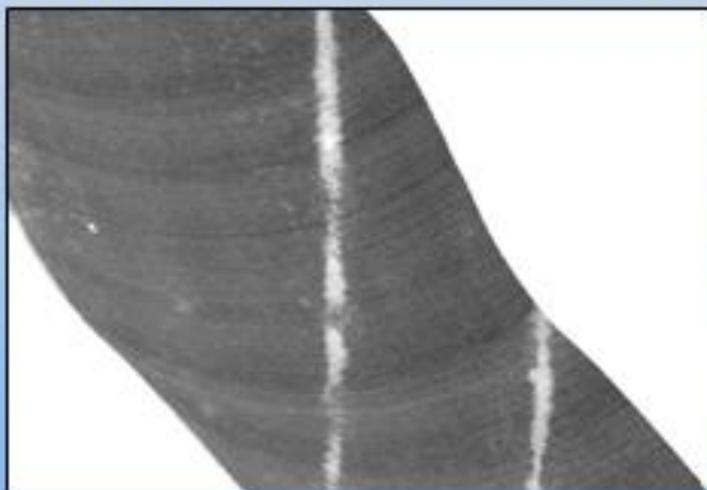
Cost difference of teplovisual and visual methods of control estimated as 10 millions US \$ for 1 000 km by 10 years.

TEPLOVISUAL CONTROL

VISUAL CONTROL

Тепловой след трубопроводов

THERMAL PICTURE



Thermal trace

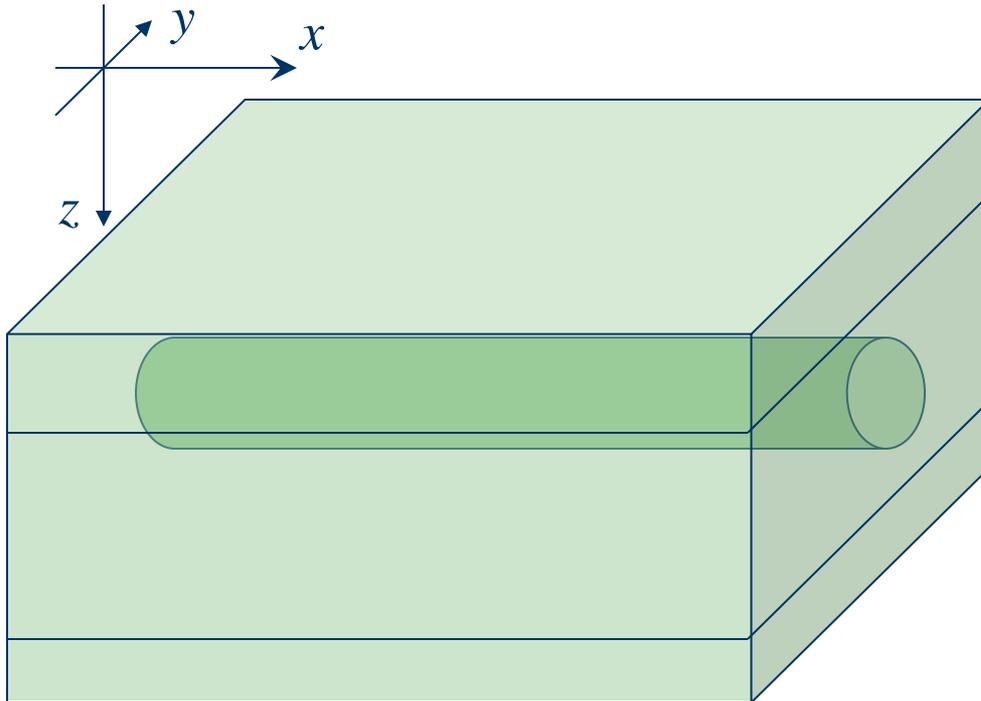
Pipeline

Thermal uniformity

Описание задачи

Рассматривается задача о распространении тепла в грунте от нагретой и теплоизолированной трубы. Поток тепла от трубы увеличивается в местах повреждения оболочки.

$T=T(t,x,y,z)$ – распределение температуры. Задача описывается линейным уравнением теплопроводности.



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

$$\lambda = \frac{\text{К}}{\rho c_v} \begin{array}{l} \text{коэффициент} \\ \text{температуропроводности} \end{array}$$

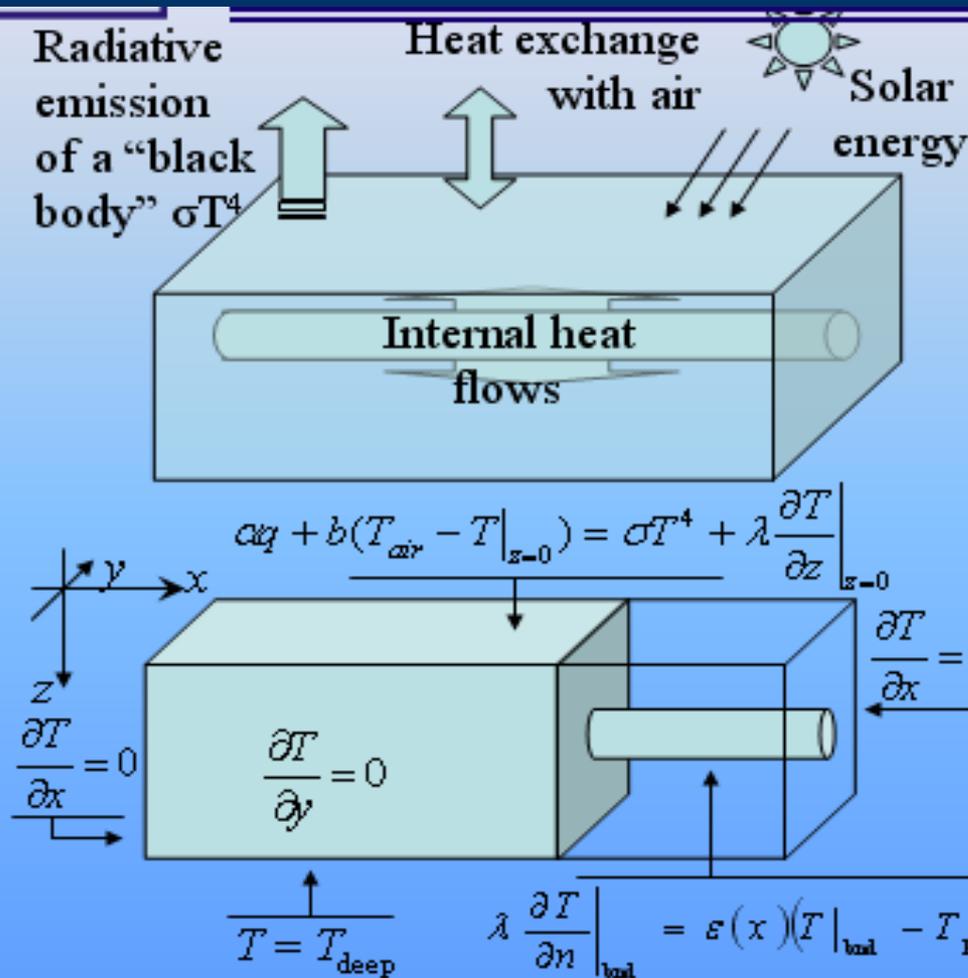
К - теплопроводность

ρ - плотность

c_v - удельная теплоемкость

Область может иметь несколько слоев с различными λ

Тепловые потоки



Consider a problem of thermal diffusivity from heated and isolated pipeline. Heat flow from the pipeline is proportional to difference of ground and pipeline temperature, and the coefficient is essentially increase at places where the isolating shell has wear. $T(t, x, y, z)$ – temperature distribution. The problem is described by a diffusivity equation

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Начальные и граничные условия

Начальные условия

$$T(0, x, y, z) = T_0(z) = T_{\text{возд}} + (T_{\text{глуб}} - T_{\text{возд}})z, \quad 0 \leq z \leq L_z$$

Граничные условия

$$\alpha q + b(T_{\text{возд}} - T|_{z=0}) = \sigma T^4 + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0$$

$$T|_{z=L_z} = T_{\text{глуб}}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{гр}} = \varepsilon(x) (T|_{\text{гр}} - T_{\text{трубы}}) n$$

Описание расчетной методики

- Для расчета распределения температуры в трехмерной области используется метод конечных разностей с расщеплением по пространственным переменным.
- Используется ортогональная сетка, равномерная или адаптирующаяся по z вблизи поверхности.
- Исходное уравнение по каждому из пространственных направлений аппроксимируется неявной центрально-разностной трехточечной схемой.
- Система разностных линейных алгебраических уравнений имеет трехдиагональный вид и решается методом прогонки.
- Для решения нелинейного алгебраического уравнения 4-ой степени (на верхней границе) используется метод Ньютона.

Неоднородная оболочка трубопровода (данные для расчета)

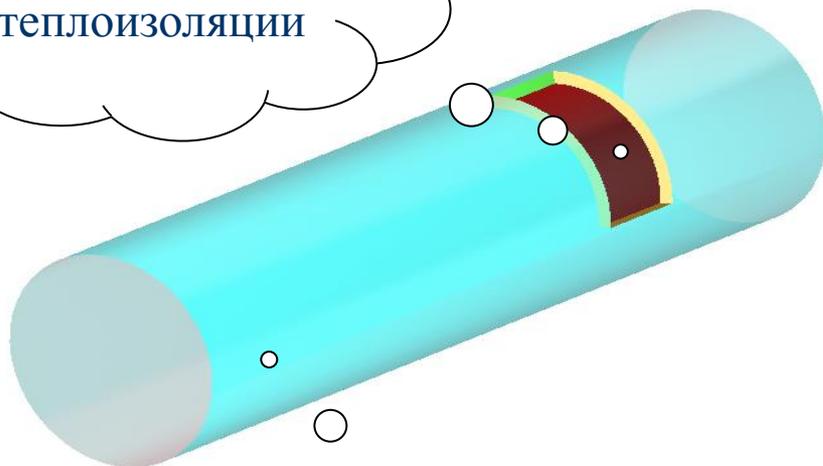
Наименование	Численное значение
Температура воздуха, С ⁰	0
Температура грунта, С ⁰	0
Температура в трубе, С ⁰	100
Плотность грунта, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	1300
Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	1.7
Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	850
Размеры области (X x Y x Z), м	2 x 2 x 2
Диаметр трубы, м	0.5*
Глубина залегания трубы (центр трубы), м	1
Конечное время расчета, сутки	20

* – для 4-го эксперимента диаметр трубы равен 0.2 м

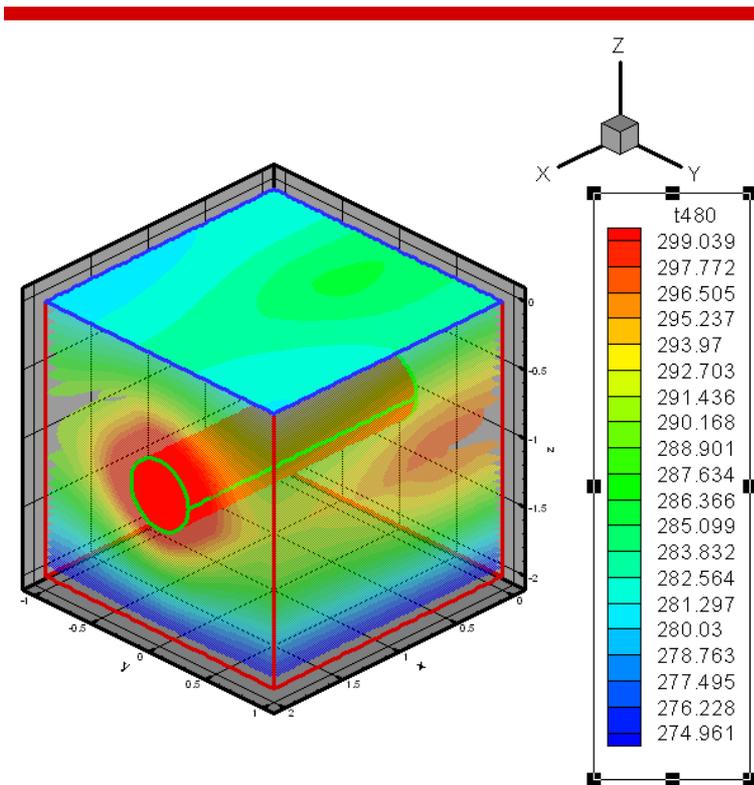
Численный эксперимент 1

Повреждение
теплоизоляции

Вид трубы



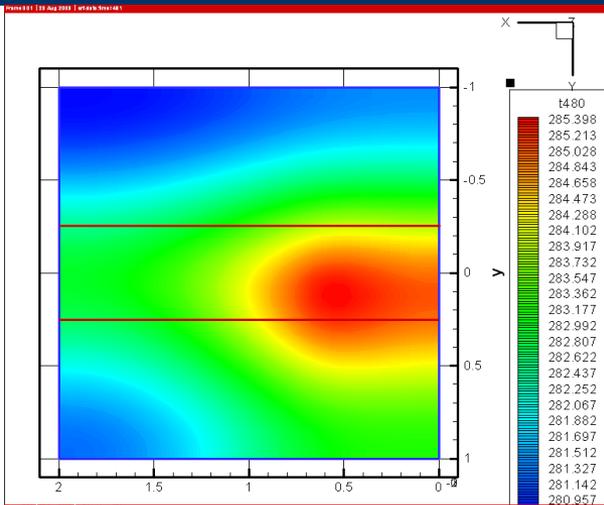
Стальная труба,
покрытая
теплоизоляцией



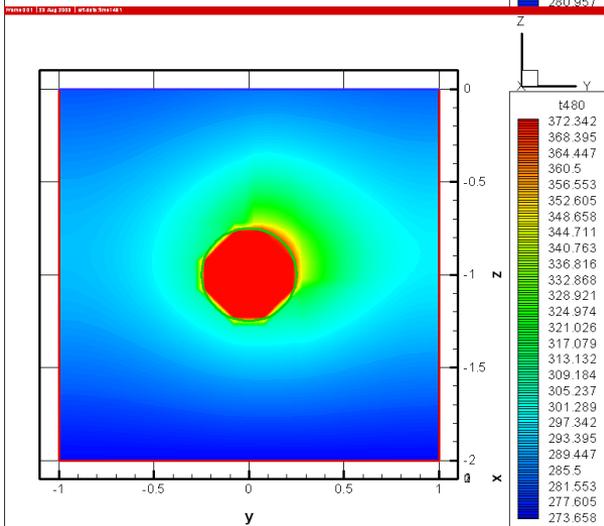
Вид трубы в грунте

Численный эксперимент 1 (продолжение)

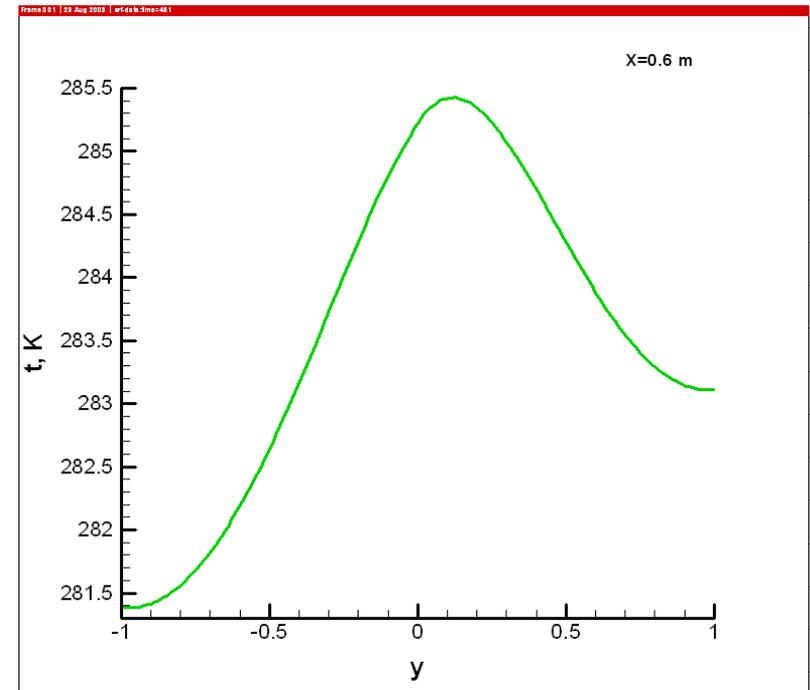
(а)



(б)



(в)



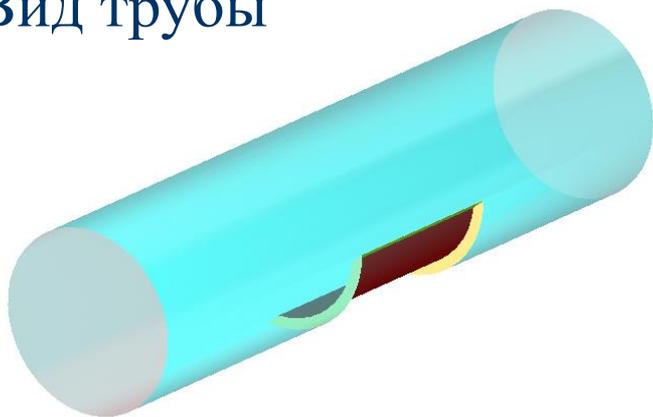
(а) Распределение температур на поверхности грунта

(б) На плоскости, $\parallel YZ$, при $X=0.6$ м.

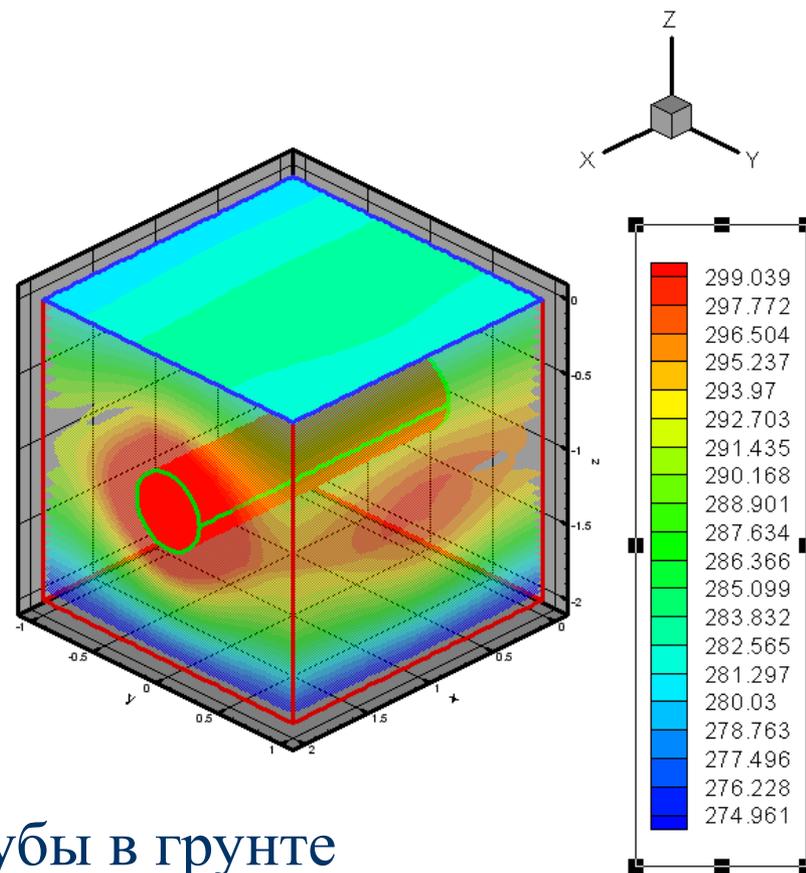
(в) Распределение температур на прямой $X=0.6, Z=0$

Численный эксперимент 2

Вид трубы



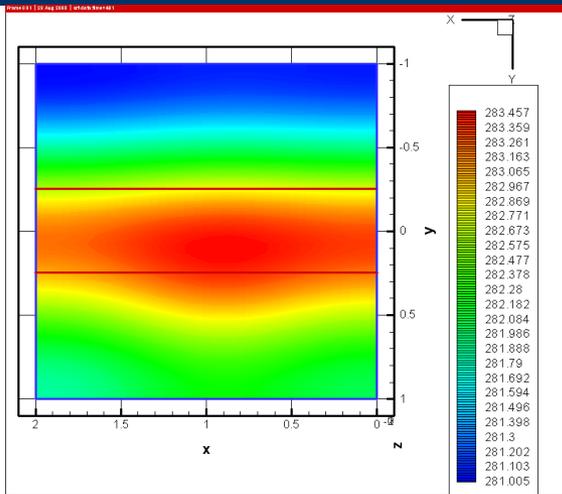
Time=481



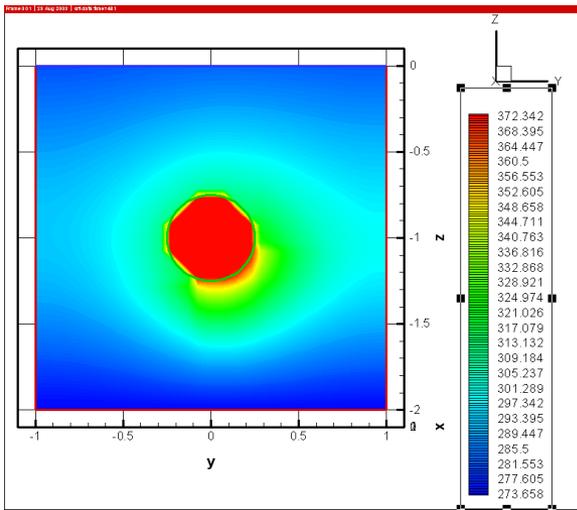
Вид трубы в грунте

Численный эксперимент 2 (продолжение)

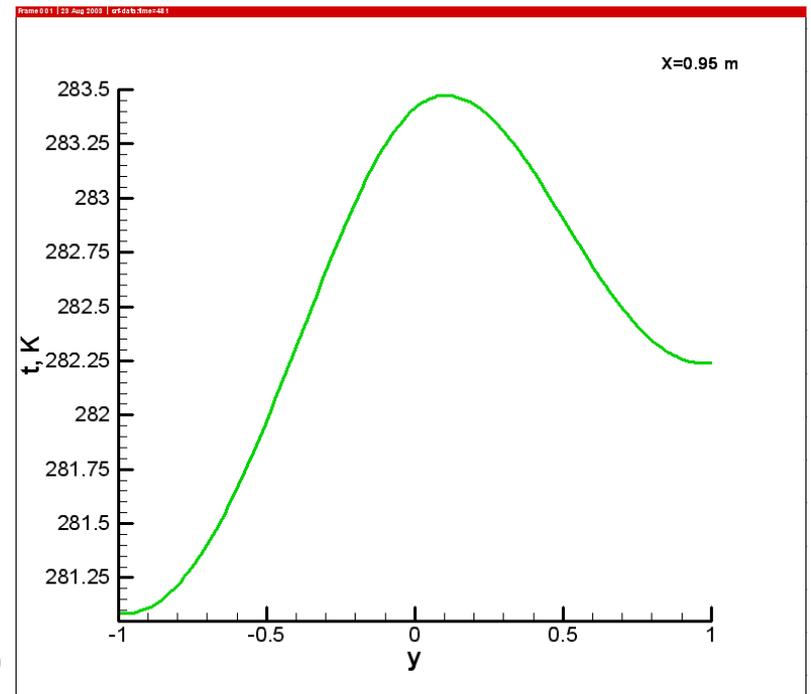
(а)



(б)



(в)



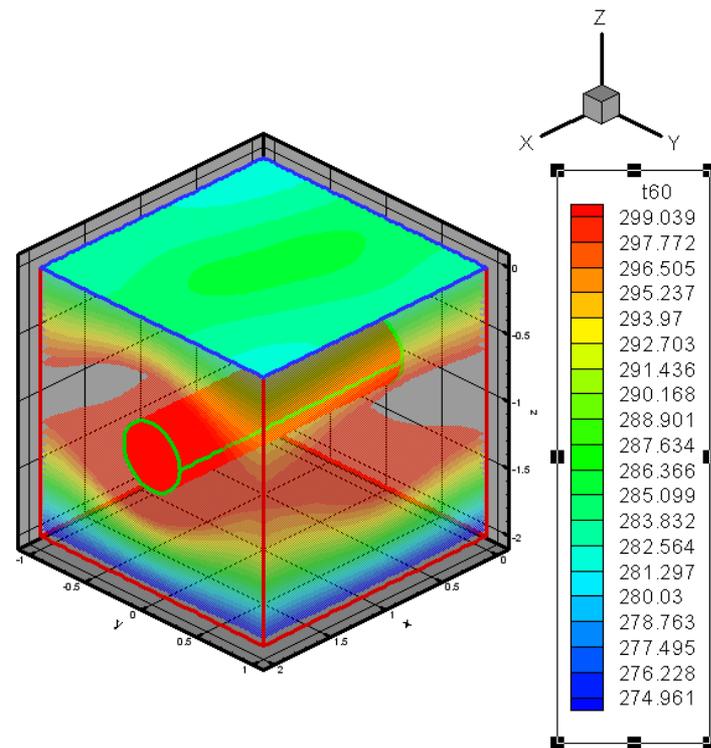
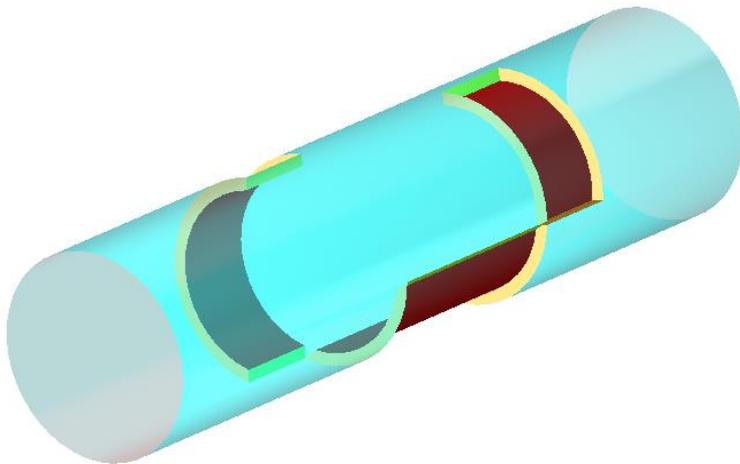
(а) Распределение температур на поверхности грунта

(б) На плоскости, $\parallel YZ$, при $X=0.6$ м.

(в) Распределение температур на прямой $X=0.6, Z=0$

Численный эксперимент 3

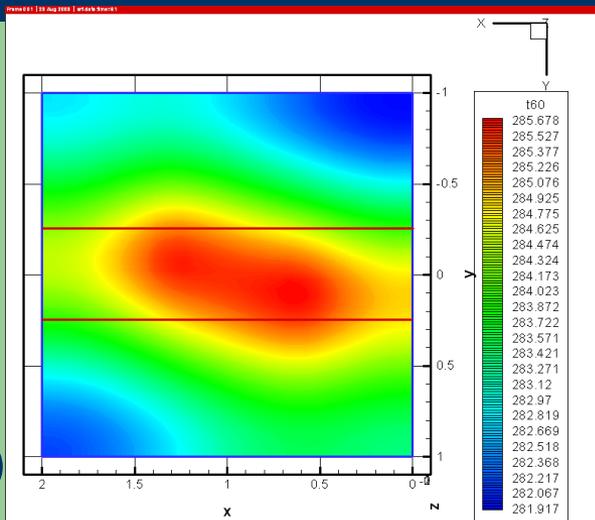
Вид трубы



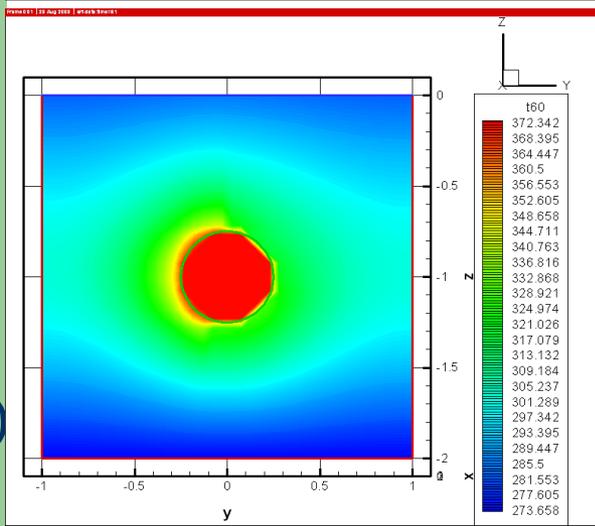
Вид трубы в грунте

Численный эксперимент 3 (продолжение)

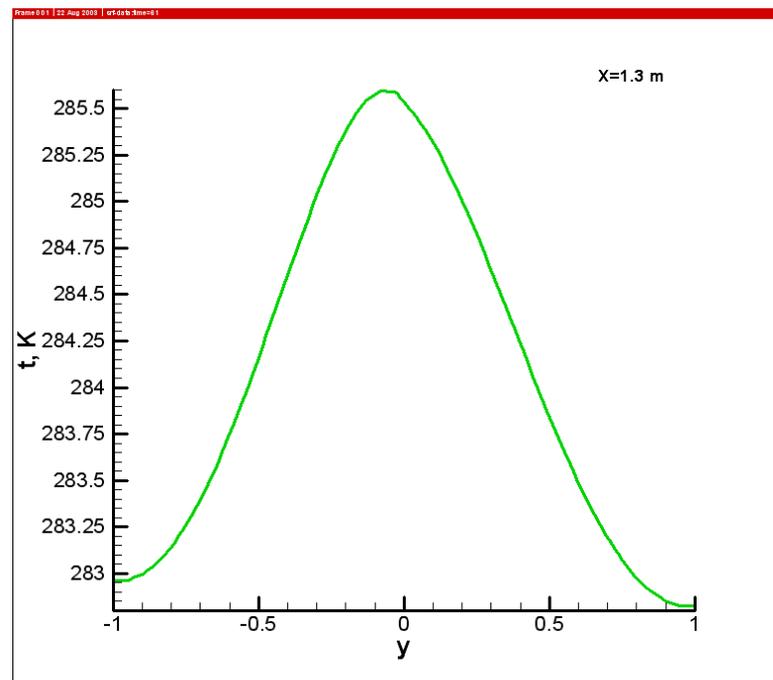
(а)



(б)



(в)



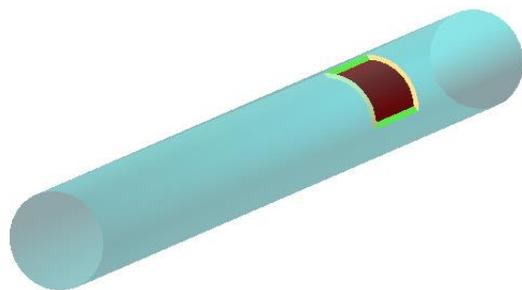
(а) Распределение температур на поверхности грунта

(б) На плоскости, $\parallel YZ$, при $X=1.3$ м.

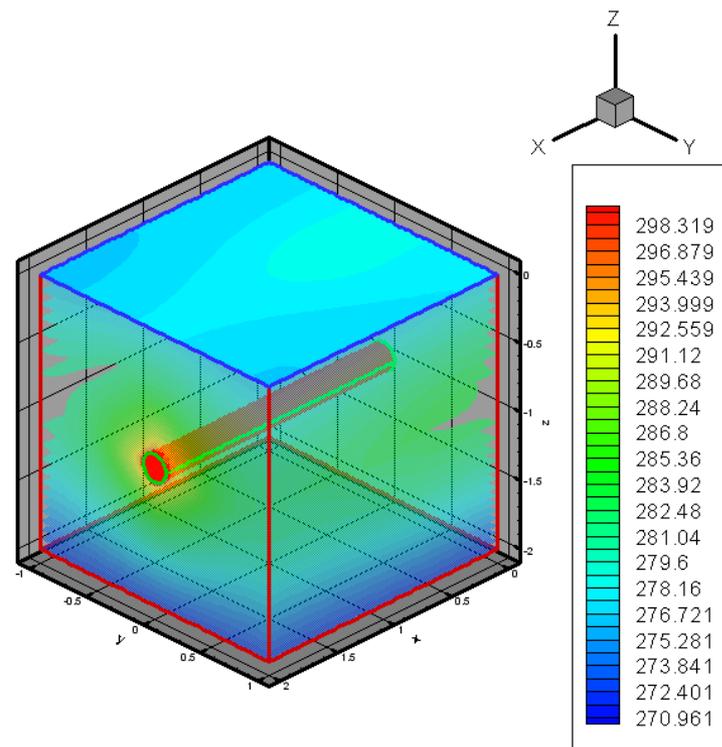
(в) Распределение температур на прямой $X=1.3, Z=0$

Численный эксперимент 4

Вид трубы



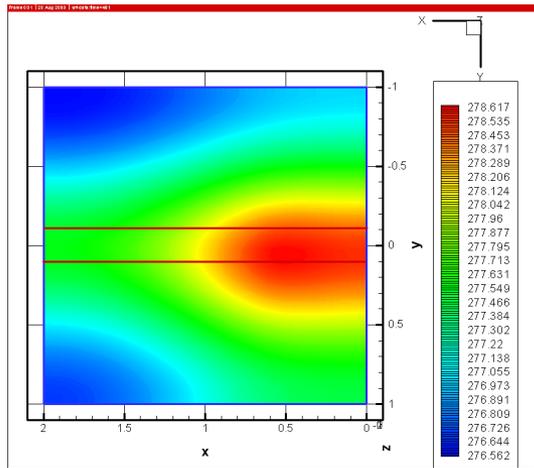
07.05.16 14m-48 1



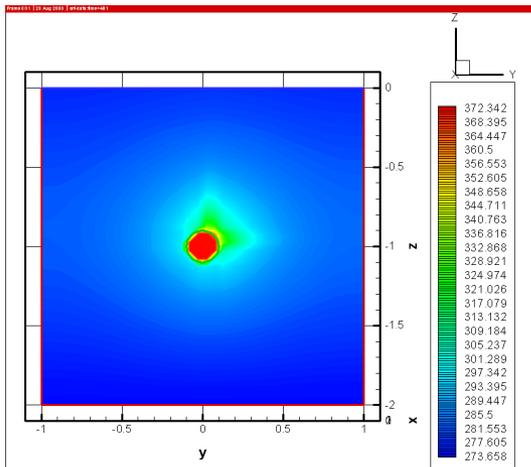
Вид трубы в грунте

Численный эксперимент 4 (продолжение)

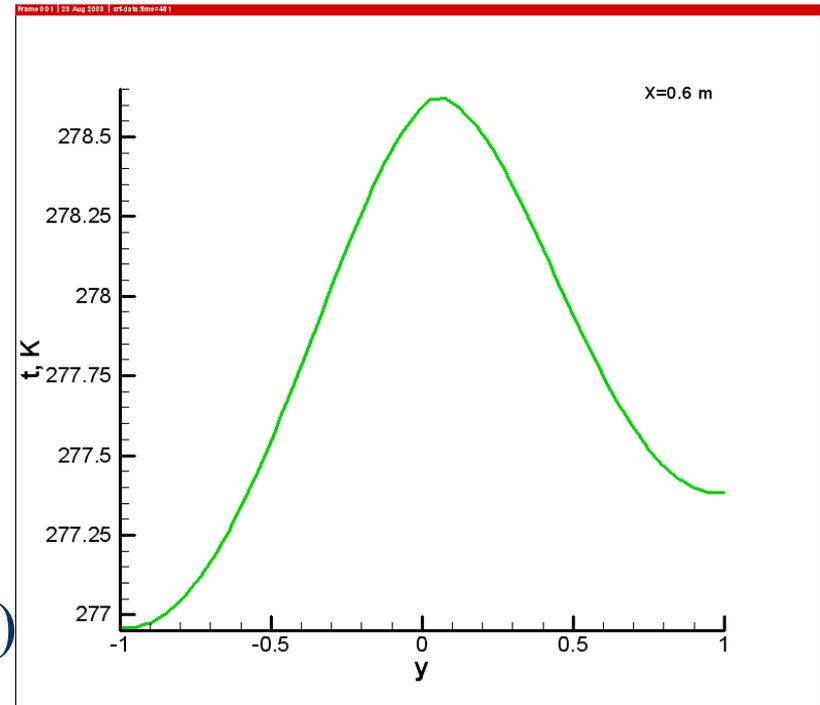
(а)



(б)



(в)

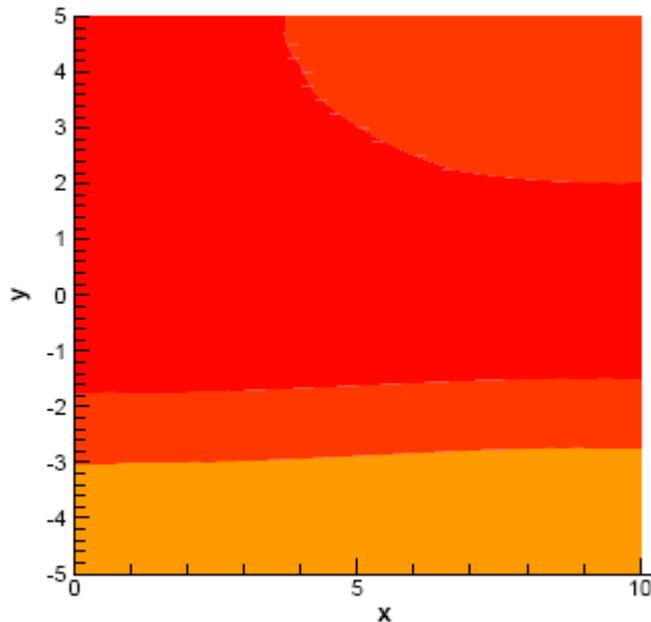


(а) Распределение температур на поверхности грунта

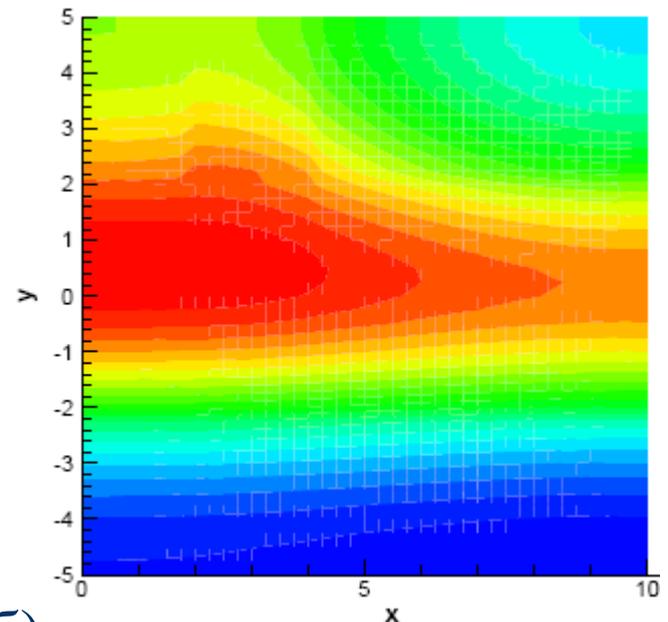
(б) На плоскости, $\parallel YZ$, при $X=0.6$ м.

(в) Распределение температур на прямой $X=0.6, Z=0$

Сравнение температурного поля на поверхности грунта



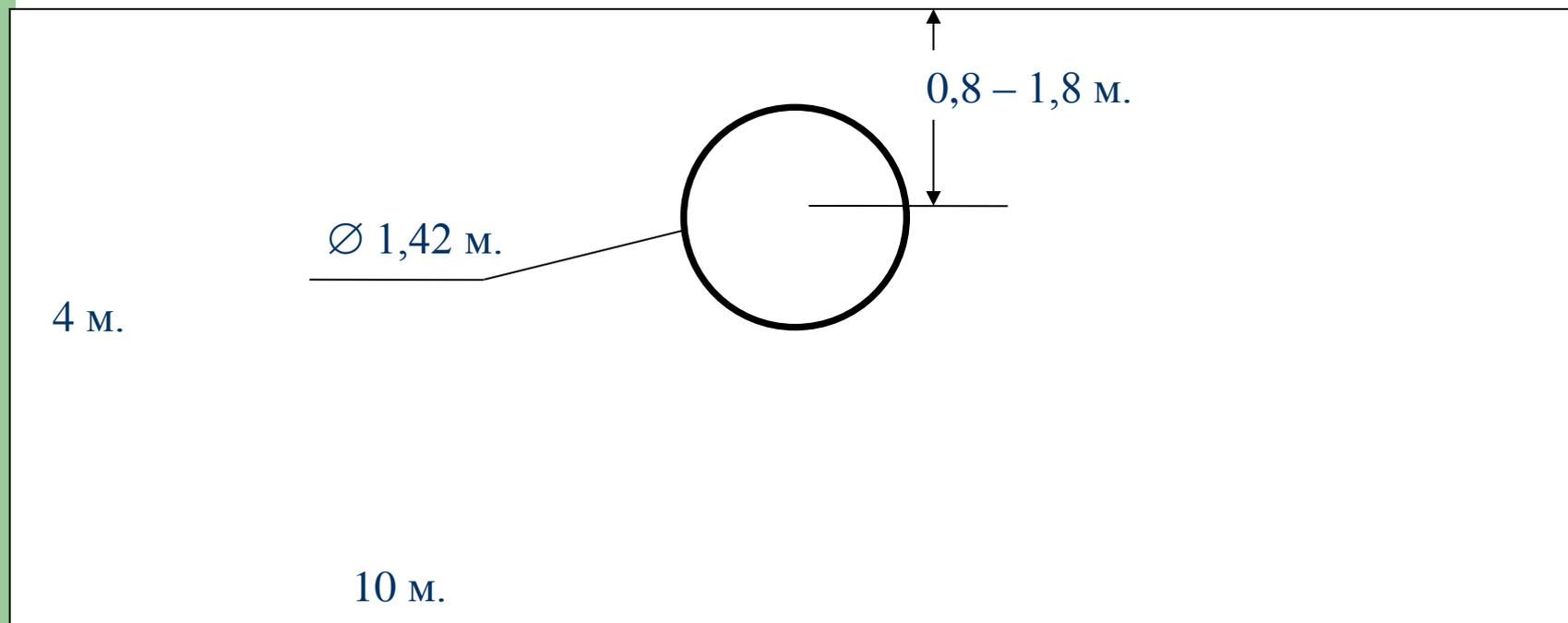
(a)



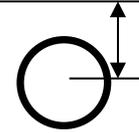
(б)

Сравнение температурного поля на поверхности грунта, освещенного солнцем (а), и неосвещенного солнцем (б).

Схема расчетной области (изменение глубины залегания трубопровода).

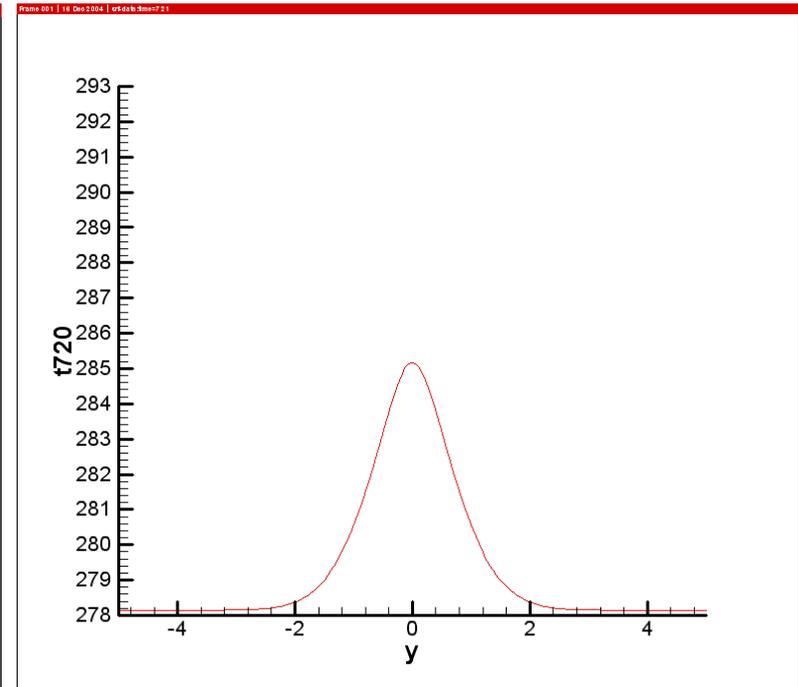
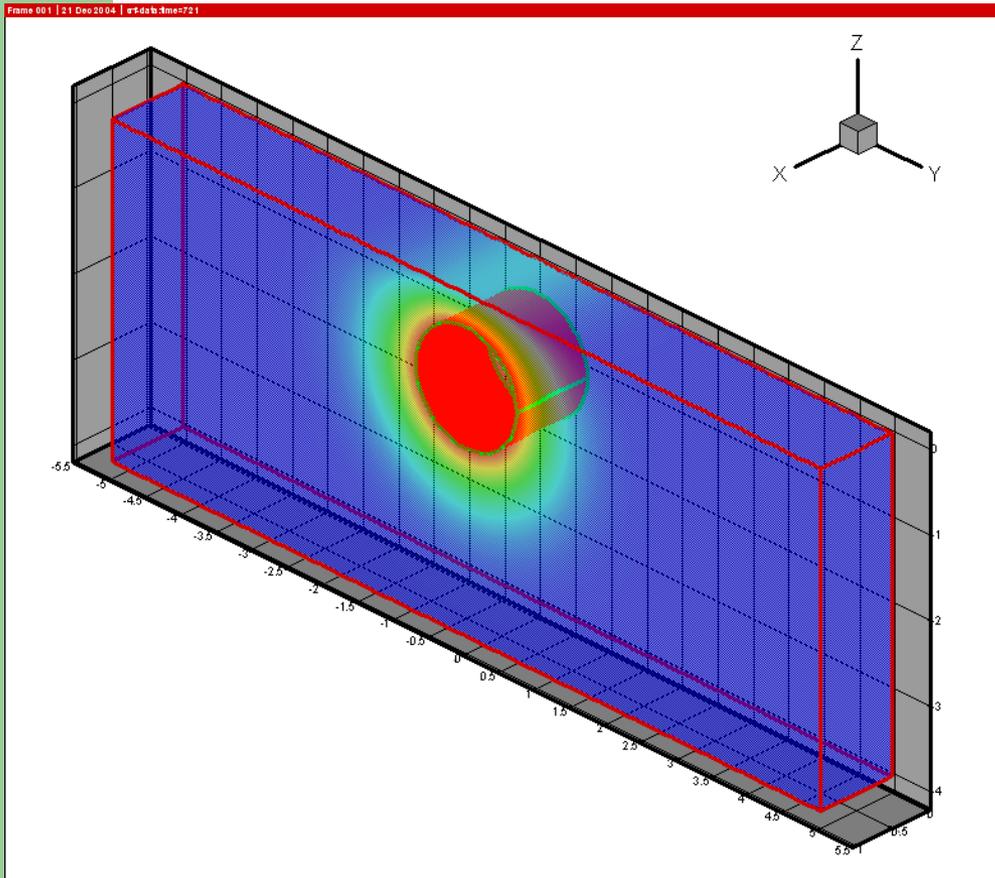


Параметры расчета



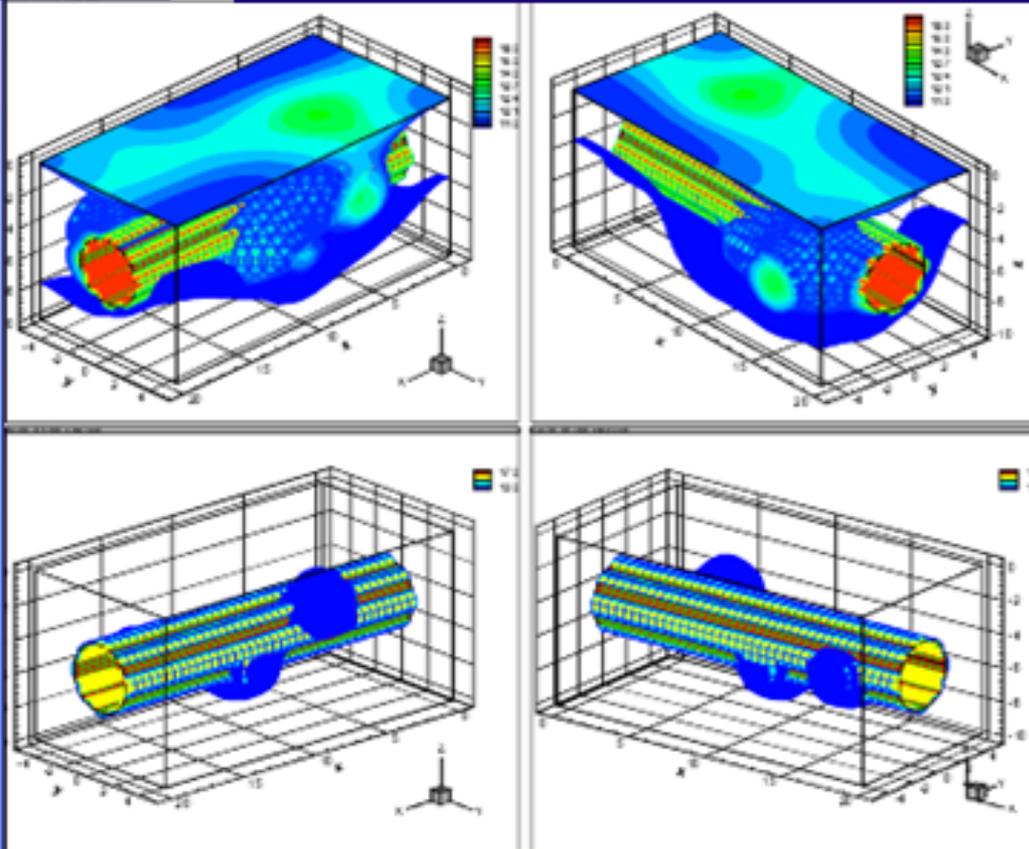
Параметр	Ед.измерения	Значение
Температура воздуха	К	273.15
Температура грунта	К	273.15
Температура в трубе	К	303.15
Плотность грунта (глина)	кг/м ³	1750
Теплопроводность	Вт/м К	0.586
Удельная теплоемкость	Дж/кг К	1004.83
Размеры области	М	1 x 10 x 4
Диаметр трубопровода	м	0.71
Глубина залегания центра трубопровода	м	0.80-2.40
Конечное время расчета	сутки	20

Распределение температуры в области



**Профиль температуры
на поверхности**

Numerical simulations



Goal:

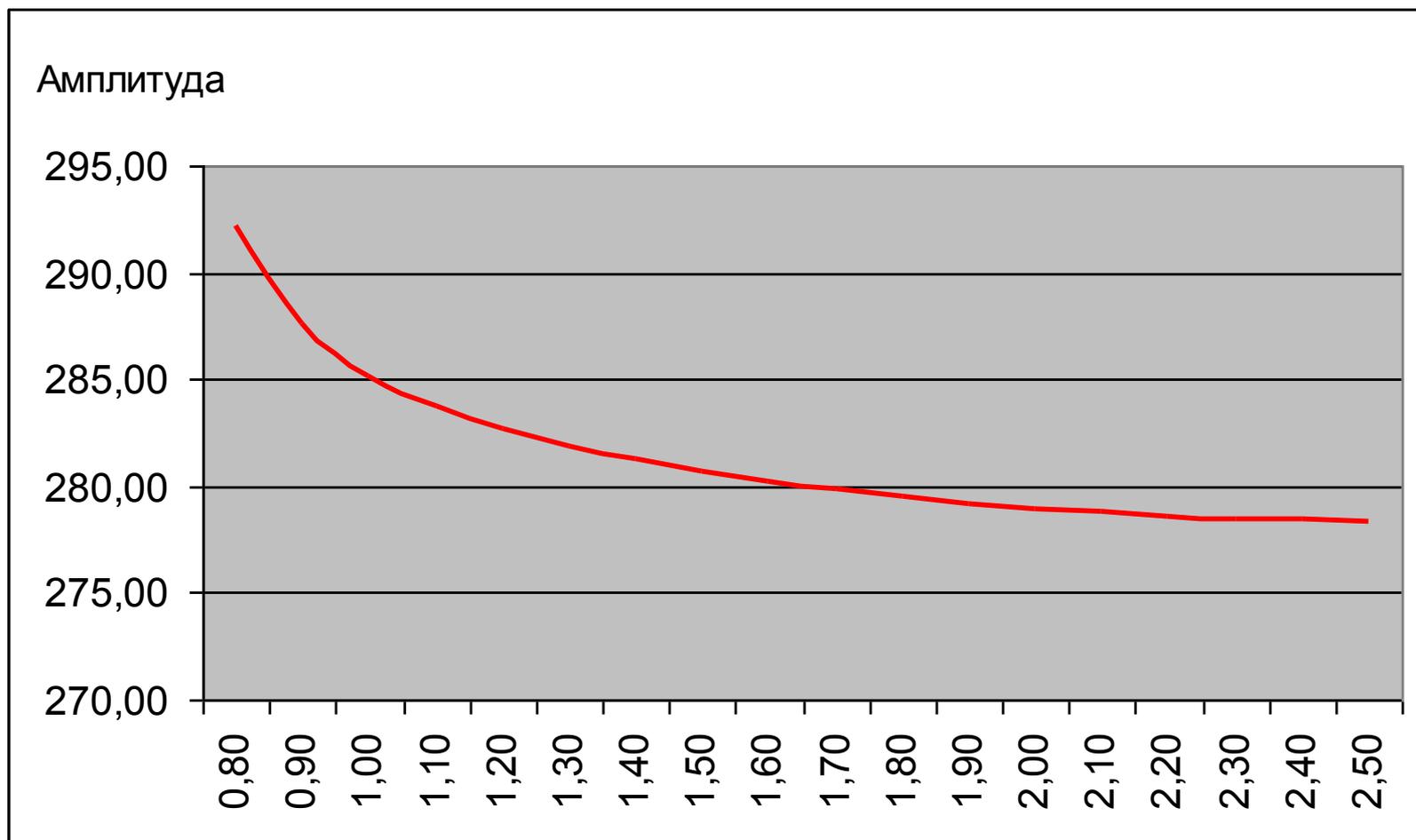
to create an application for solving of a direct problem of thermal diffusivity from different (active and passive) heat sources in heterogeneous media to earth surface.

Resulting goal:

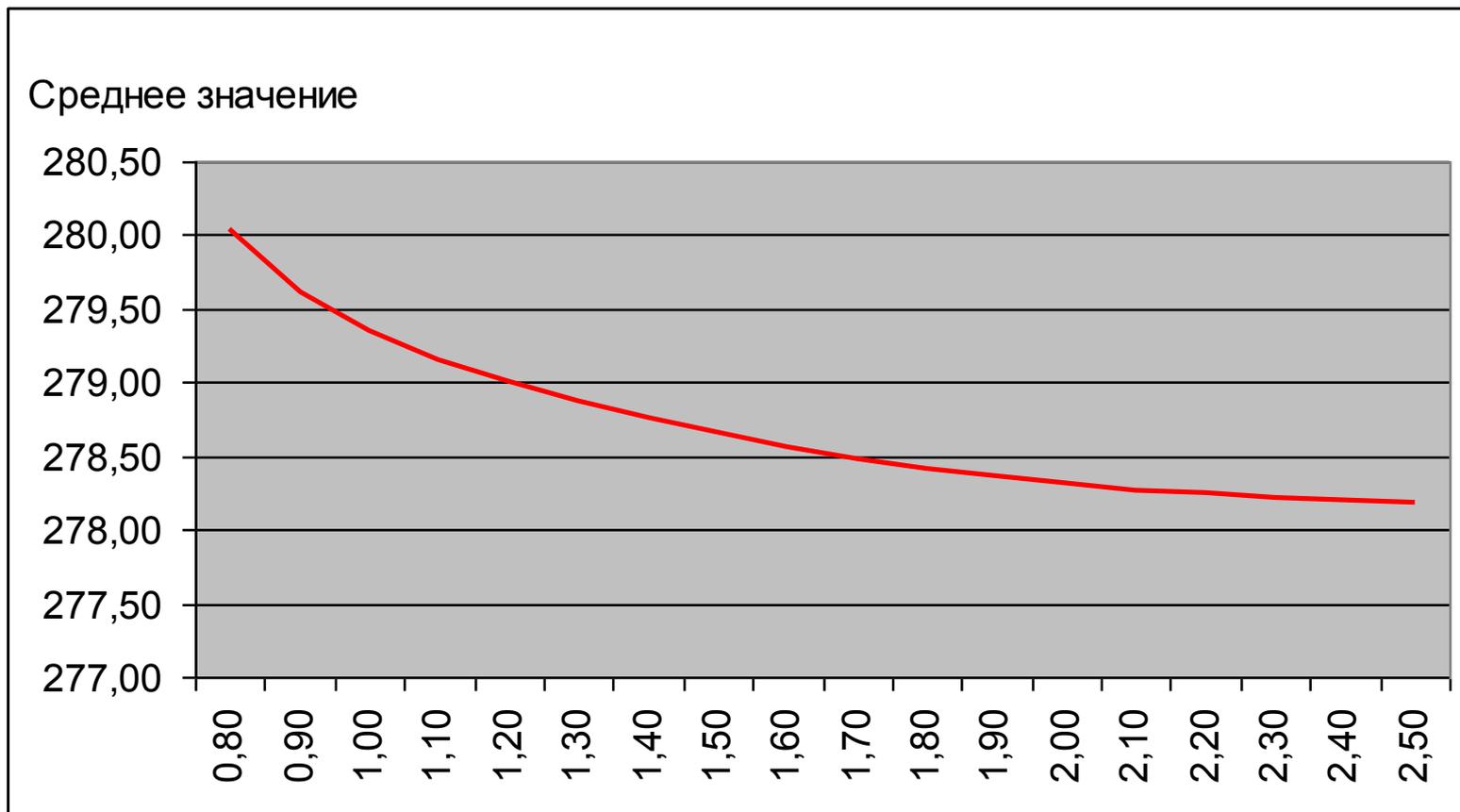
to solve a problem of interpretation of results of teplovisual monitoring

Numerical simulations with the program complex help to make a right conclusion of wholeness of a pipeline shell.

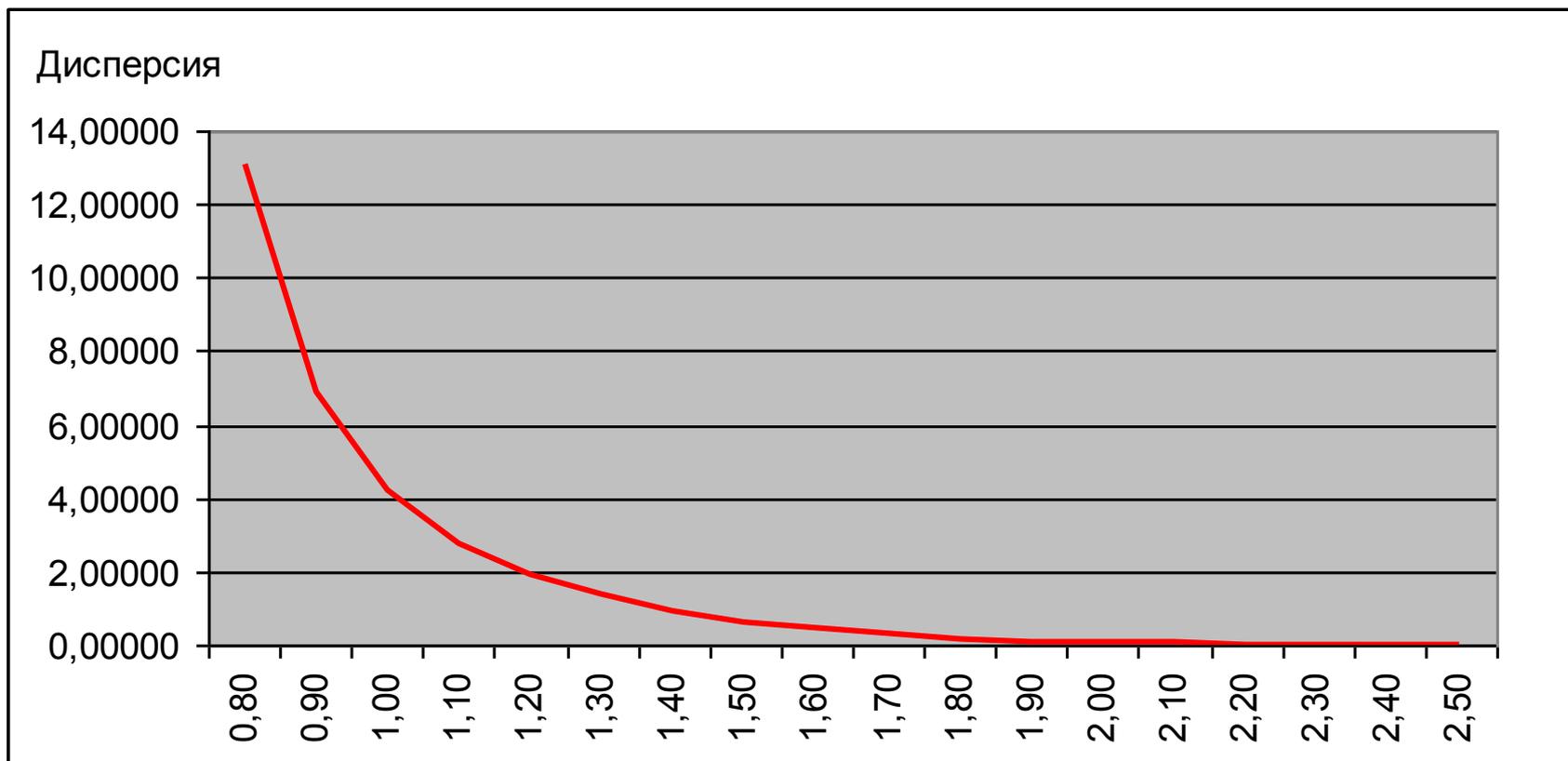
Амплитуда температуры



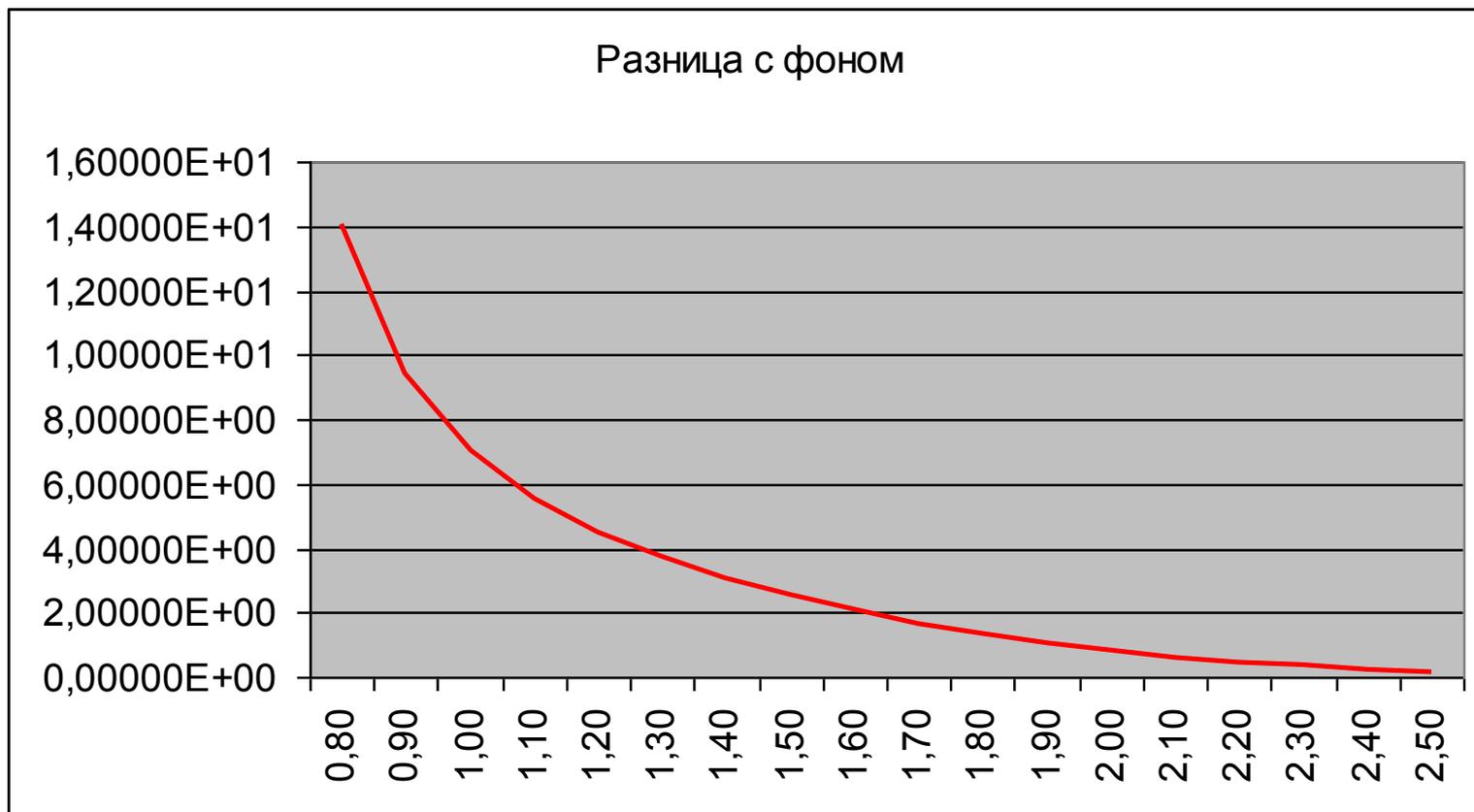
Среднее значение температуры



Дисперсия профиля температуры



Разница с фоновой температурой



Задачи

Теоретические:

Сравнение линейной и нелинейной модели при расчете распределения температуры на дневной поверхности.

Численное моделирование конвективных потоков фильтрующейся в грунте жидкости при наличии источника тепла.

Сравнение модели распределения температуры без учета и с учетом конвективного переноса

Практические:

Анализ эффективности проведения тепловизионных съемок в зависимости от уровня освещенности.

Некоторые результаты

Созданный комплекс программ предназначен для проведения численного моделирования тепловых полей в приповерхностном слое грунта с учетом

- термодиффузионных свойств грунта;
- неоднородности грунта по слоям;
- теплообмена поверхности грунта с воздухом, в том числе и за счет потерь тепла на излучение.

С его помощью возможно проведение серий вычислительных экспериментов, позволяющих делать прогнозы об эффективности тепловизионных съемок поверхности грунта при тех или иных погодных условиях, а также для обработки и анализа данных о составе грунта и его влиянии на формирование теплового следа от заглубленного источника тепла (трубопровода).