

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Инженерная защита окружающей среды»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсового проекта

по дисциплинам

«Численные методы в системах теплогазоснабжения и вентиляции»,

«Расчет температурного поля вокруг бесканального теплопровода»

для обучающихся по направлению подготовки

08.03.01 «Строительство»

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2022

УДК 621.1

Составитель А.Л. Тихомиров

Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплинам «Численные методы в системах теплогазоснабжения и вентиляции», «Расчет температурного поля вокруг бесканального теплопровода» для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / сост. А.Л. Тихомиров. – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2023. – 24 с.

Методические указания определяют объем, состав и последовательность выполнения курсового проекта. Содержат необходимый справочный и теоретический материал. В методических указаниях приводятся основные сведения об использовании численных методов в расчетах систем теплогазоснабжения и вентиляции.

Предназначены для обучающихся очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» при выполнении курсового проекта по дисциплине «Численные методы в системах теплогазоснабжения и вентиляции».

УДК 621.1

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Инженерная защита
окружающей среды» д-р техн. наук, В.И. Беспалов

В печать 9.01.2023 г.
Формат 60×84/16. Объем 1,5 усл. п. л.
Тираж 50 экз. Заказ № 57

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2023

Введение

Задачи математического моделирования и оптимизации энергетических процессов и установок достаточно сложны и в большинстве случаев не могут быть в полной мере описаны аналитическими формулами.

Расчет температурных полей в грунте вокруг теплопроводов имеет важное прикладное значение: определение фактических теплотерь, термическое влияние на смежные коммуникации и инженерные сооружения и т.д.

Решение таких задач связано со значительными трудностями, обусловленными геометрией области, сложностью физических процессов распространения тепла в грунтах, вероятностным характером внешних воздействий и т.д.

Для решения задачи определения температурного поля вокруг подземных теплопроводов необходим учет многих факторов и условий, в том числе:

- наличие естественного температурного поля земли, возникающего вследствие воздействия природных факторов;
- необходимость задания граничных условий, соответствующих реальному теплообмену в системе «теплопровод-грунт-атмосфера»;
- несимметричность задачи при двух- и многотрубной прокладке теплопроводов;
- наличие тепловой изоляции на трубах;
- расположение в зоне прокладки инженерных сооружений, термически влияющих на температурное поле теплопроводов.

Простыми инженерными формулами невозможно описать многообразие вышеперечисленных факторов. Между тем, ряд актуальных задач до настоящего времени не решен вследствие сложности математического аппарата, которым приходится пользоваться при интегрировании основного уравнения теплопроводности. Вследствие этого рассматриваемая задача не имеет на сегодняшний день точного аналитического решения.

Развитие вычислительной техники значительно расширило возможности расчетчика. Численные методы, реализуемые на компьютере, не накладывают каких-либо ограничений на количество контуров и на соотношение коэффициентов теплопереноса отдельных элементов. Одновременно, метод позволяет задавать на поверхности трубопроводов и границе массива грунта граничные условия любого рода. Приведенный далеко не полный обзор проблем расчета температурных полей в грунте вокруг подземных теплопроводов показывает, что наиболее эффективным способом решения этих задач является численный метод с применением соответствующего программного обеспечения.

1. Постановка задачи для расчета температурного поля в грунте вокруг бесканального теплопровода

Физическая модель и система координат задачи теплопроводности представлены на рисунке 1. Рассматривается бесканальная прокладка двухтрубного теплопровода диаметром D . Так как применяемые в системах теплоснабжения трубопроводы обладают незначительной толщиной стенки и высоким коэффициентом теплопроводности, перепадом температур в стенке трубы пренебрегаем. Тепловая изоляция трубопроводов характеризуется размером σ . Температура теплоносителя в трубе равна τ . Вследствие того, что в трубопроводах имеет место развитое турбулентное течение с большим коэффициентом теплоотдачи от горячей воды к внутренней поверхности трубы, температура поверхности трубы принимается равной температуре теплоносителя. Глубина заложения трубопровода – h . Коэффициенты теплопроводности грунта и тепловой изоляции известны и равны соответственно $\lambda_{гр}$ и $\lambda_{из}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта в атмосферу принимается равным α . Учитывая, что при работе тепловых сетей градиент температур вдоль оси трубопровода значительно меньше, чем в радиальном направлении, исходная задача переноса рассматривается как двухмерная. Задача теплопроводности в системе «теплопровод – грунт» рассматривается как сопряженная, включает уравнение Лапласа для областей грунт и тепловая изоляция

$$\nabla^2 t_{гр} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 t_{из} = 0. \quad (2)$$

и соответствующие краевые условия.

На границе Γ_1 (поверхность трубы) приняты граничные условия I рода

$$t_{из}|_{\Gamma_1} = \tau, \quad (3)$$

На границе Γ_2 (поверхность изоляции - грунт) задаются условия сопряжения

$$\lambda_{из} \frac{\partial t_{из}}{\partial n} |_{\Gamma_2} = \lambda_{гр} \frac{\partial t_{гр}}{\partial n} |_{\Gamma_2} \quad (4)$$

$$t_{из} |_{\Gamma_2} = t_{гр} |_{\Gamma_2} \quad (5)$$

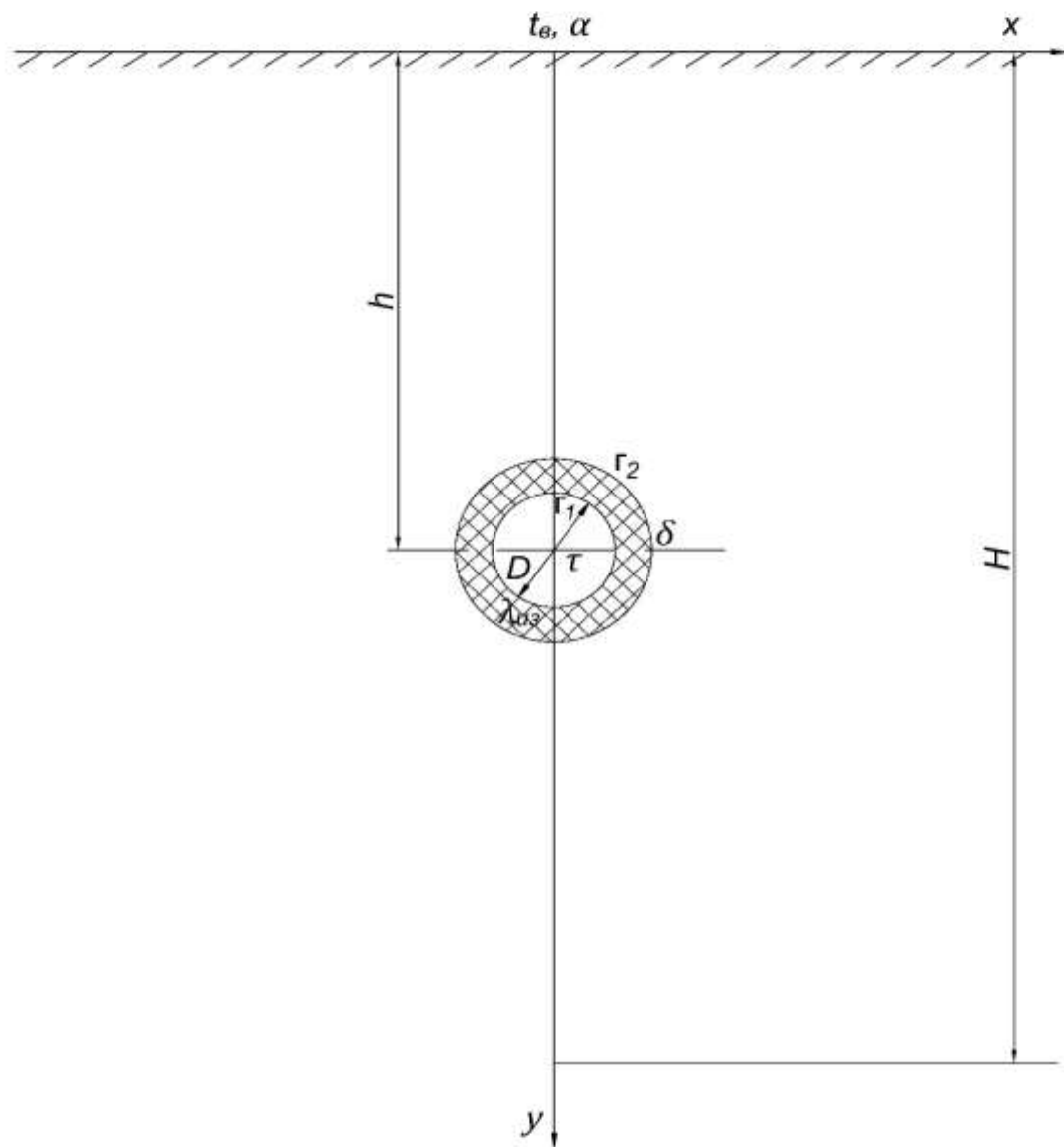


Рисунок 1. Физическая модель и система координат задачи теплопроводности

На границе (поверхность грунта – атмосфера) приняты граничные условия III рода

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial t_{\text{гр}}}{\partial y} = \alpha(t_{\text{гр}} - t_{\text{в}}), \quad y=0 \quad (6)$$

Условия на бесконечности

$$\frac{\partial t_{\text{гр}}}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm \infty, \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_{\text{гр}}}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow \pm \infty. \quad (8)$$

Для температурного поля исследуемой области нельзя найти строгого аналитического решения, так как требуемые граничные условия не могут быть одновременно удовлетворены как в прямоугольной, так и цилиндрической системе координат.

2. Выбор инструмента для решения задачи теплопроводности

В качестве инструмента решения задачи теплопроводности в курсовом проекте применяется программный комплекс ELCUT. Алгоритм загрузки этого комплекса приведен в приложении А. Эта программа позволяет выполнять линейный и нелинейный стационарный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке. Формулировка задачи основывается на стационарном уравнении теплопроводности с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = -q \quad (9)$$

В основу алгоритма расчета положена конечно-разностная схема аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных и краевых условий на неравномерной сетке.

При постановке задачи могут быть использованы следующие возможности программы:

- *свойства сред* – ортотропные материалы с постоянной теплопроводностью, изотропные материалы, с теплопроводностью, зависящей от температуры;
- *источники поля* – постоянные и зависящие от температуры объемные источники тепловой мощности, конвективные и радиационные источники;
- *граничные условия* – заданная температура, заданный тепловой поток на границе, условия радиационного и конвективного теплообмена, а также поверхности с постоянной, заранее неизвестной температурой.

В результате расчета могут быть получены: температура, градиент температуры, плотность теплового потока и интегральные значения теплового потока через заданные поверхности.

3. Методические указания к выполнению курсового проекта

3.1 Задание на выполнение курсового проекта

- Рассчитать и построить температурное поле в массиве грунта в зоне прокладки изолированного теплопровода;
- определить температуру массива грунта в точке с координатами x, y .

Вариант задания для каждого раздела методического указания принимается из таблицы №1 в строке, соответствующей последней цифре номера зачетной книжки. При выполнении задания используется пример приведенный в главе 4.

3.2 Выбор параметров задачи

Коэффициент теплопроводности грунта

Массив грунта является термическим сопротивлением на пути теплового потока, направленного от теплоносителя к границе раздела «грунт-атмосфера» и выполняет роль изоляции в тех случаях, когда основной теплоизоляционный слой нарушен. Теплофизические характеристики грунта существенно влияют на общее термическое сопротивление теплопередаче и, как следствие, на теплопотери трубопроводов.

В данном курсовом проекте коэффициент теплопроводности грунта $Вт/(м \cdot К)$ следует определять по формуле В.И. Дубницкого, с достаточной степенью точности, описывающей зависимость капиллярно-пористых тел от влагосодержания и температуры

$$\lambda_{грз} = \lambda_{гр0} + KW + (B + gt_{гр}^2) \frac{W}{W^2 + C}, \quad (10)$$

где W - удельное влагосодержание, $кг/кг$.

Константы K, B, g, C для ряда грунтов приведены в приложении Б.

Коэффициент теплоотдачи на границе «поверхность грунта-атмосфера»

Коэффициент теплоотдачи на границе «поверхность грунта-атмосфера» в инженерной практике определяется по формуле Вирца, $Вт/м^2 \cdot К$

$$\alpha = 15,1 \sqrt{U}, \quad (11)$$

где U – скорость ветра, $м/с$.

Таблица 1

Шифр	h, м	грунт	U, м/с	W, кг/кг	D, м	$\delta_{из}$, м	$\lambda_{из}$, Вт/мК	τ , °C	$t_{н.в.}$, °C	$t_{гр.}$, °C	Координата точки X, м
1	1,2	Песчаный	5	0,1	0,159	0,041	0,035	104	-20	4	1,0
2	1,3	Супесчаный	6	0,12	0,219	0,042	0,036	95	-15	5	1,1
3	1,4	Глинистый	7	0,09	0,273	0,057	0,037	90	-12	6	1,2
4	1,5	Суглинистый	8	0,08	0,325	0,058	0,038	85	-10	7	1,3
5	1,6	Песчаный	9	0,07	0,426	0,058	0,039	81	-8	4	0,8
6	1,2	Супесчаный	10	0,06	0,530	0,079	0,040	78	-6	5	0,9
7	1,3	Глинистый	11	0,1	0,159	0,041	0,041	75	-5	6	1,0
8	1,4	Суглинистый	12	0,11	0,219	0,042	0,042	74	-4	7	1,1
9	1,5	Песчаный	13	0,09	0,273	0,057	0,043	72	-3	4	1,2
0	1,6	Супесчаный	14	0,08	0,325	0,058	0,044	70	-2	5	1,3

3.3 Требования к оформлению курсового проекта

Пояснительная записка курсового проекта выполняется на листах бумаги формата А4. Шрифт текста-Times New Roman 14. Межстрочный интервал-1,15.

Графическая часть курсового проекта выполняется листе формата А1.

На листе размещается следующая графическая информация:

- физическая модель и система координат задачи теплопроводности;
- расчетная сетка;
- температурное поле с изотермами и сеткой конечных элементов.

4. Пример решения задачи в ELCUT

Этапы моделирования

1. Выбор типа задачи и файлов модели
2. Задание геометрии модели
3. Задание физических свойств
4. Решение и анализ результатов

4.1 Выбор типа задачи и файлов модели

Чтобы создать задачу, выберите **Файл – Создать задачу**

Введите имя задачи и папки для хранения файлов

Панели **Создание задачи** приведены на рисунках 2 и 3.

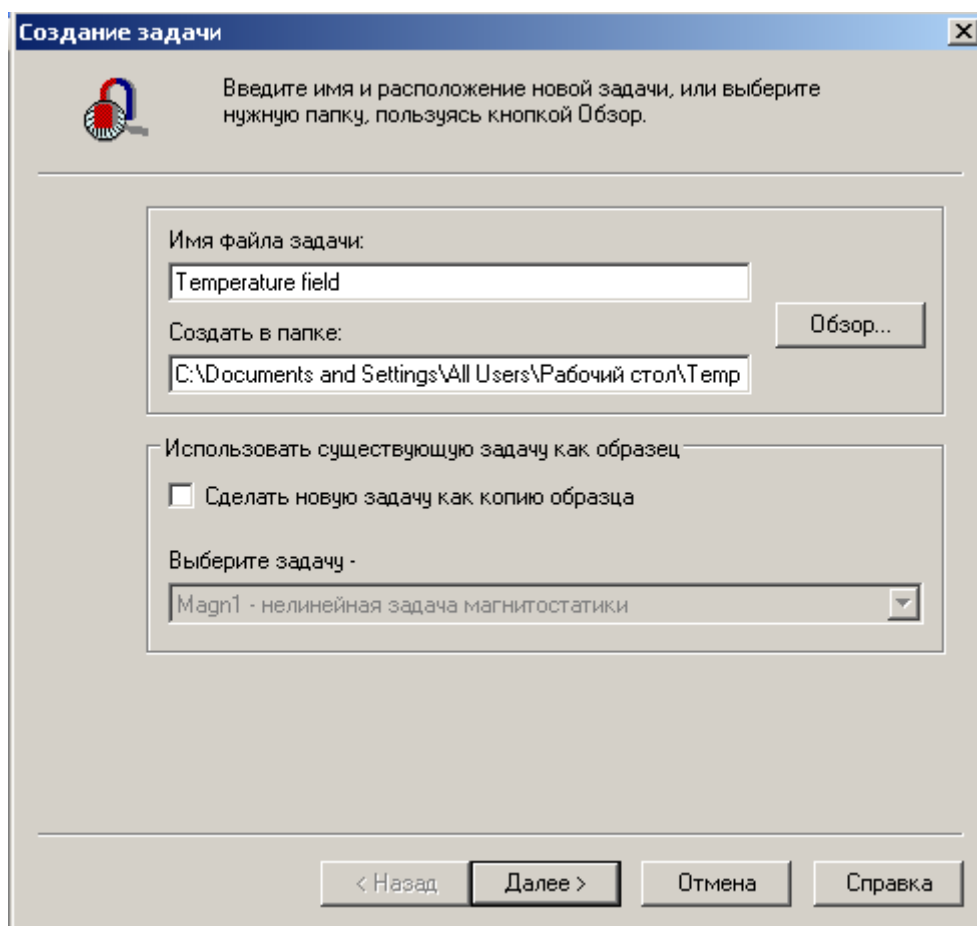


Рисунок 2. Панель Создание задачи

Выберите тип и другие параметры задачи

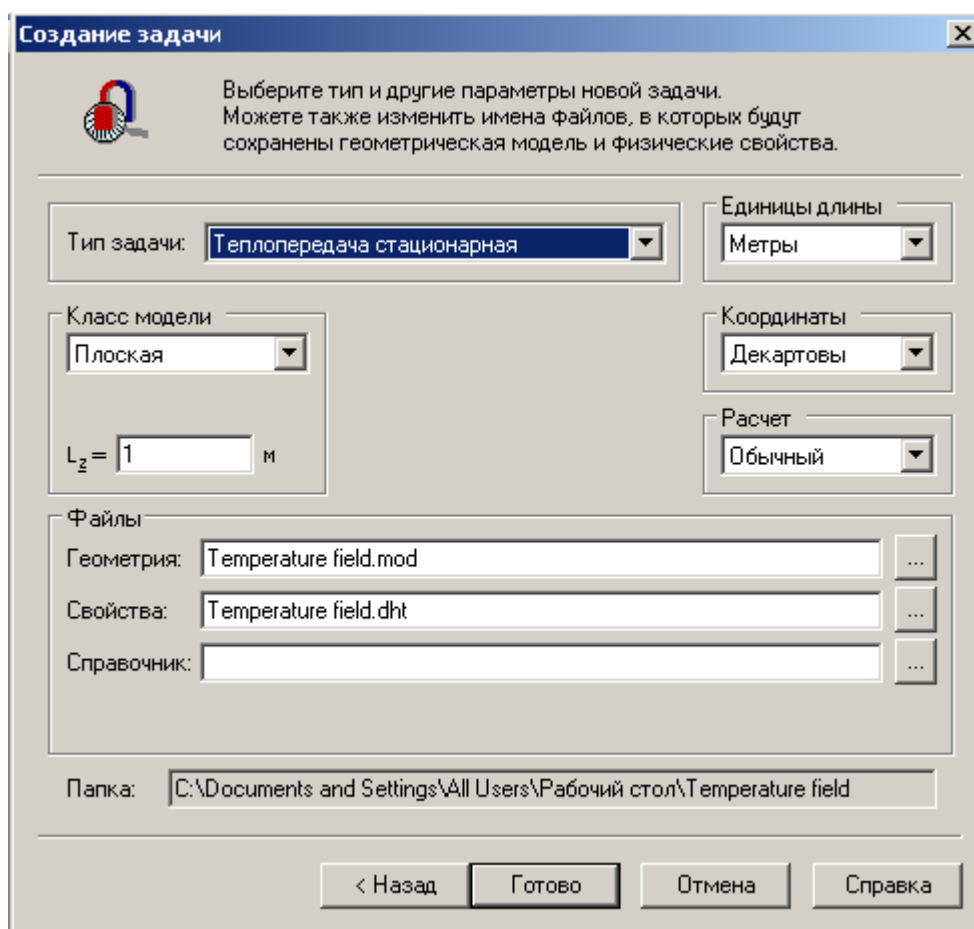


Рисунок 3. Панель Создание задачи

4.2 Создание геометрической модели

Создание модели состоит из трех основных этапов:

1. Ввод геометрических объектов
2. Задание свойств сред и граничных условий
3. Построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область

Для построения модели:

- выбрать в главном меню **Правка**;
- на панели инструментов нажать кнопку **Добавить фигуру**;
- на появившейся панели **Добавить фигуру** выбрать фигуру **Круг**.

В поле **Позиция** внести координаты **X=0**, **Y=** глубина заложения трубопровода до оси трубы по заданию, угол=0.

- в поле **Размер** введите **d**=диаметр трубопровода из задания;

Внимание:

При вводе числовых значений разделителем целой и дробной частей должна быть **точка**.

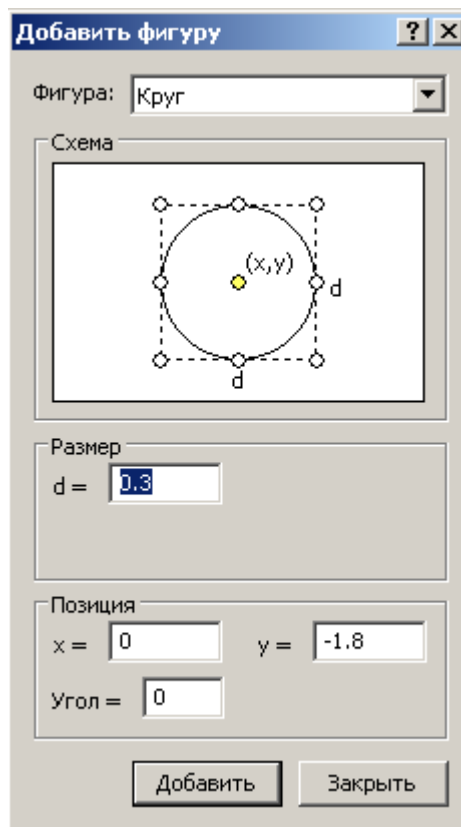


Рисунок 4. Панель **Добавить фигуру**

- нажмите кнопку **Добавить**. Получили изображение круга;

- используя толщину изоляции из задания, рассчитайте внешний диаметр слоя тепловой изоляции. Постройте геометрическую модель изолированной трубы по известным координатам ее центра.

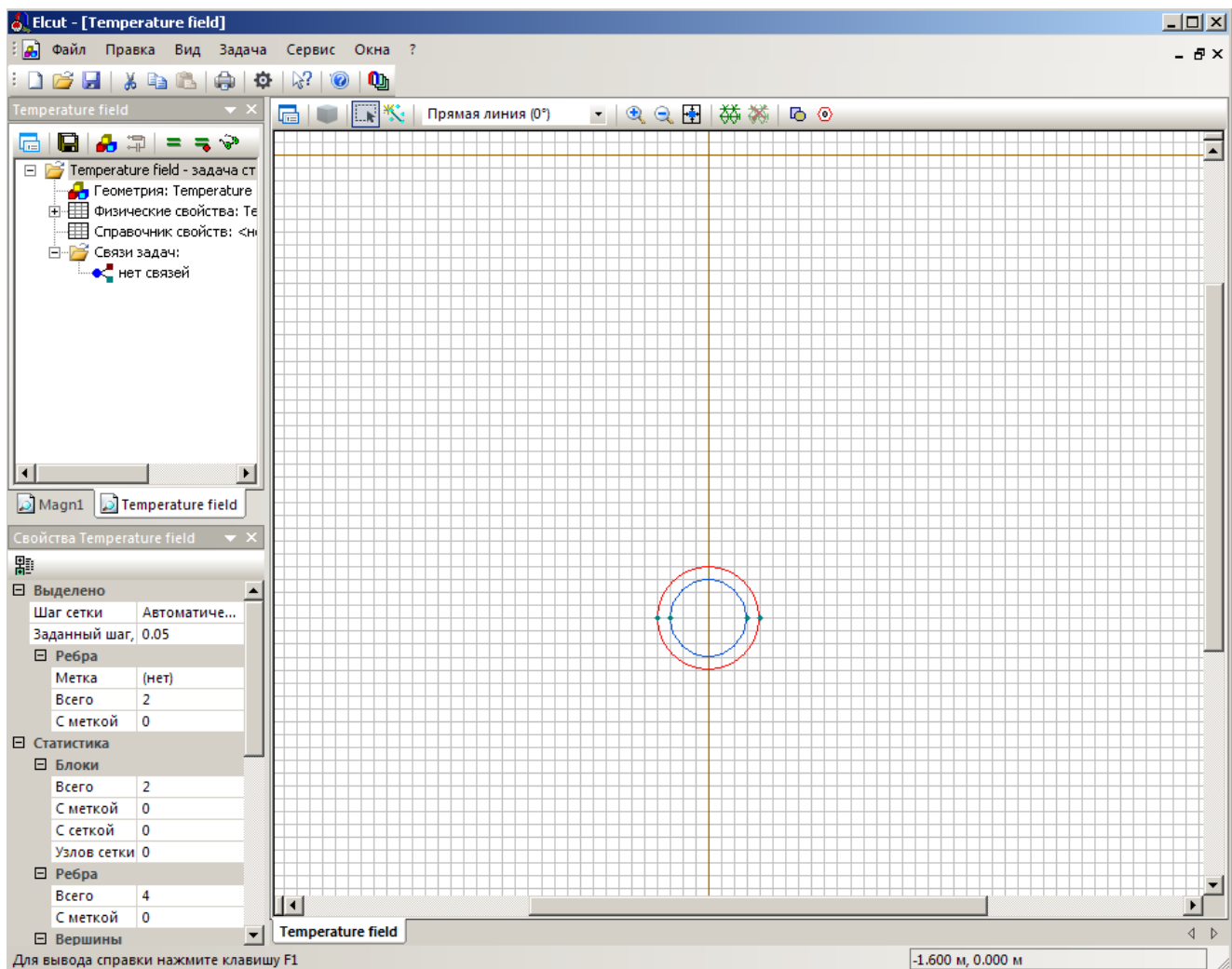


Рисунок 5. Труба с изоляцией

В режиме **Вставка**, используя прямые линии, рисуем симметрично относительно оси **Y** прямоугольник, размером 10 на 5 метров (массив грунта вокруг теплопровода). При этом верхняя граница прямоугольника должна проходить по оси **X**.

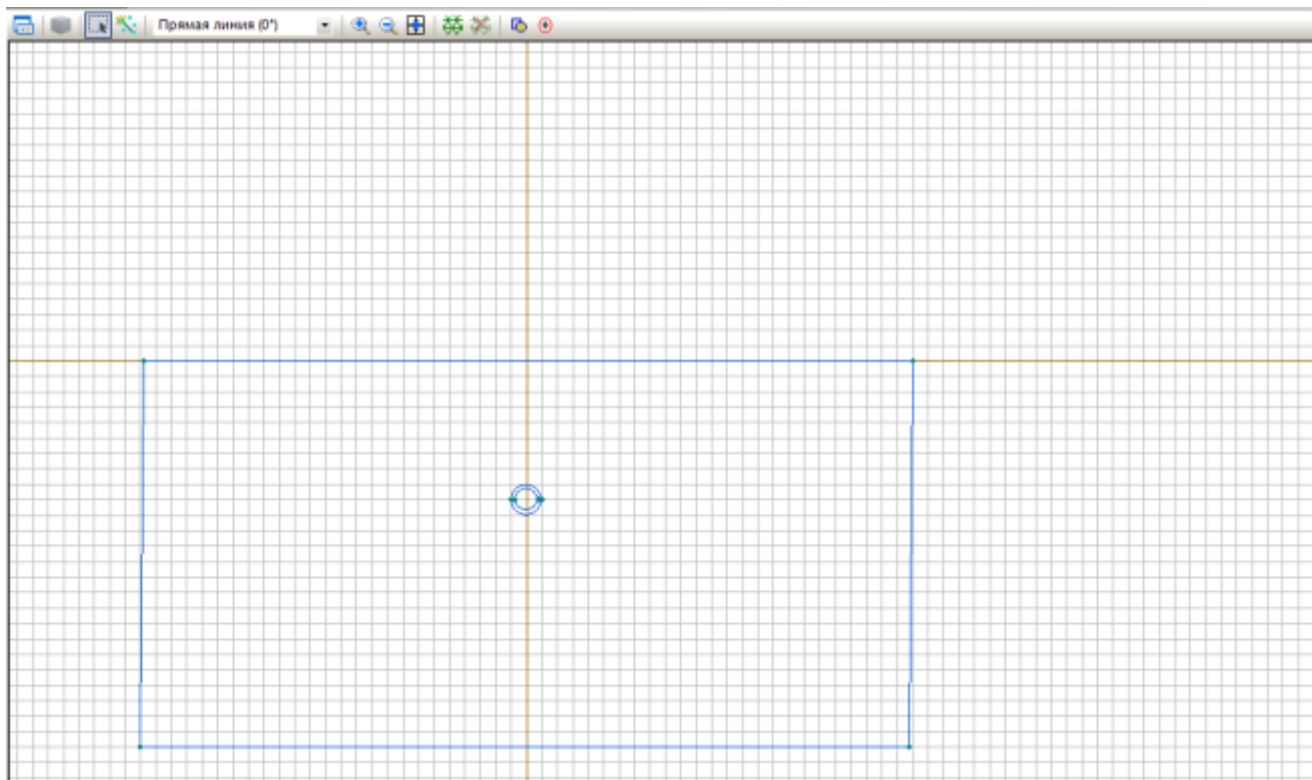


Рисунок 6. Труба с изоляцией в массиве грунта

4.3 Привязка меток к геометрическим объектам

Соответствие между геометрическими элементами модели и приписанными им свойствами материалов, граничными условиями и источниками поля устанавливается с помощью меток. Чтобы привязать метку к объекту:

1. Выделите верхнюю границу массива грунта
2. Выберите команду **Свойства** из меню **Правка** или контекстного меню
3. Введите метку (в данном случае **Верхняя граница**) в соответствующем поле диалога.

Аналогично вводятся метки для всех границ блока массива грунта:

- левая граница;
- правая граница;
- нижняя граница.

При задании меток для поверхности тепловой изоляции и поверхности трубы, следует помнить, что окружности разделены вершинами на две самостоятельные полуокружности, которые должны быть поименованы раздельно.

Для введения меток блоков следует в режиме **Выделение объектов** щелкнуть ЛКМ внутри массива. Тело блока выделится.

Аналогично выделяются и присваиваются метки блокам *Теплоизоляция* и *Теплоноситель*.

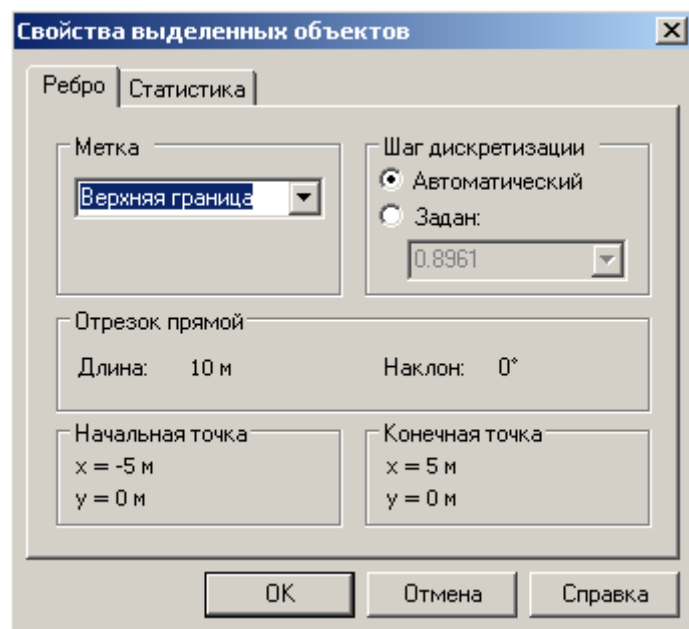


Рисунок 7. Присвоение метки объекту

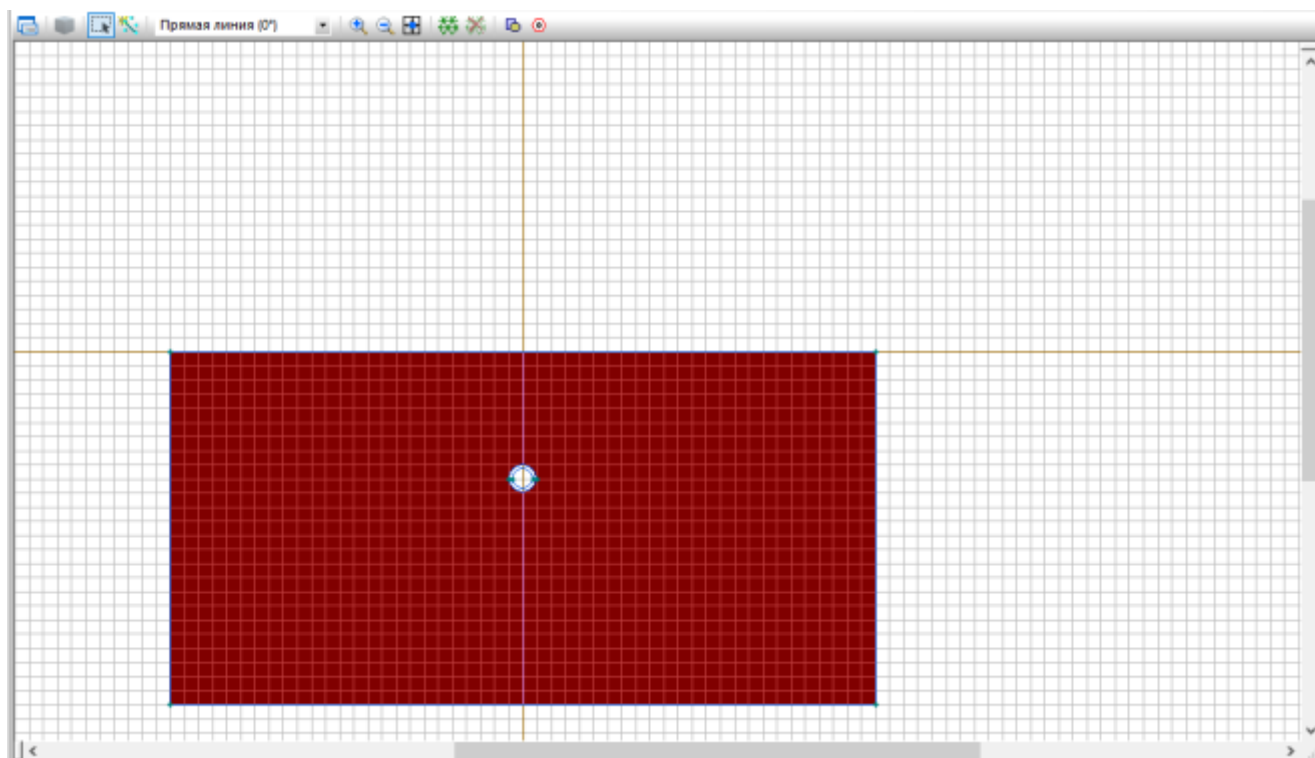


Рисунок 8. Выделение массива грунта

В результате присвоенные метки отобразятся в соответствующем окне

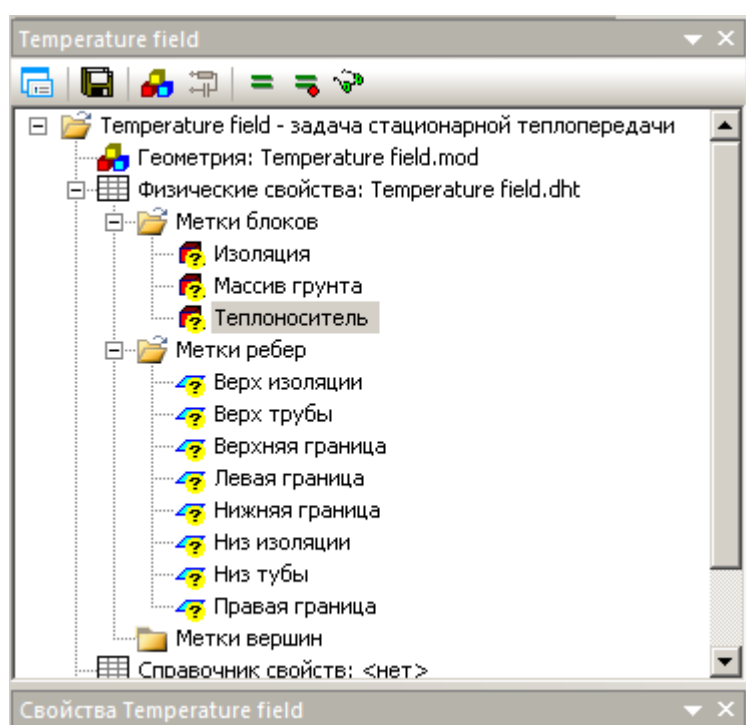


Рисунок 9. Метки

4.4 Ввод параметров задачи

Чтобы решить задачу, необходимо описать свойства сред и определить граничные условия. Эти параметры задачи хранятся в файле описания свойств.

При двумерном моделировании:

- метки блоков описывают свойства материалов;
- метки ребер описывают граничные условия на внешних и внутренних поверхностях.

Для введения свойств материалов блоков:

- щелкните ЛКМ на метке соответствующего блока;
- в правом окне введите значение коэффициента теплопроводности из задания.

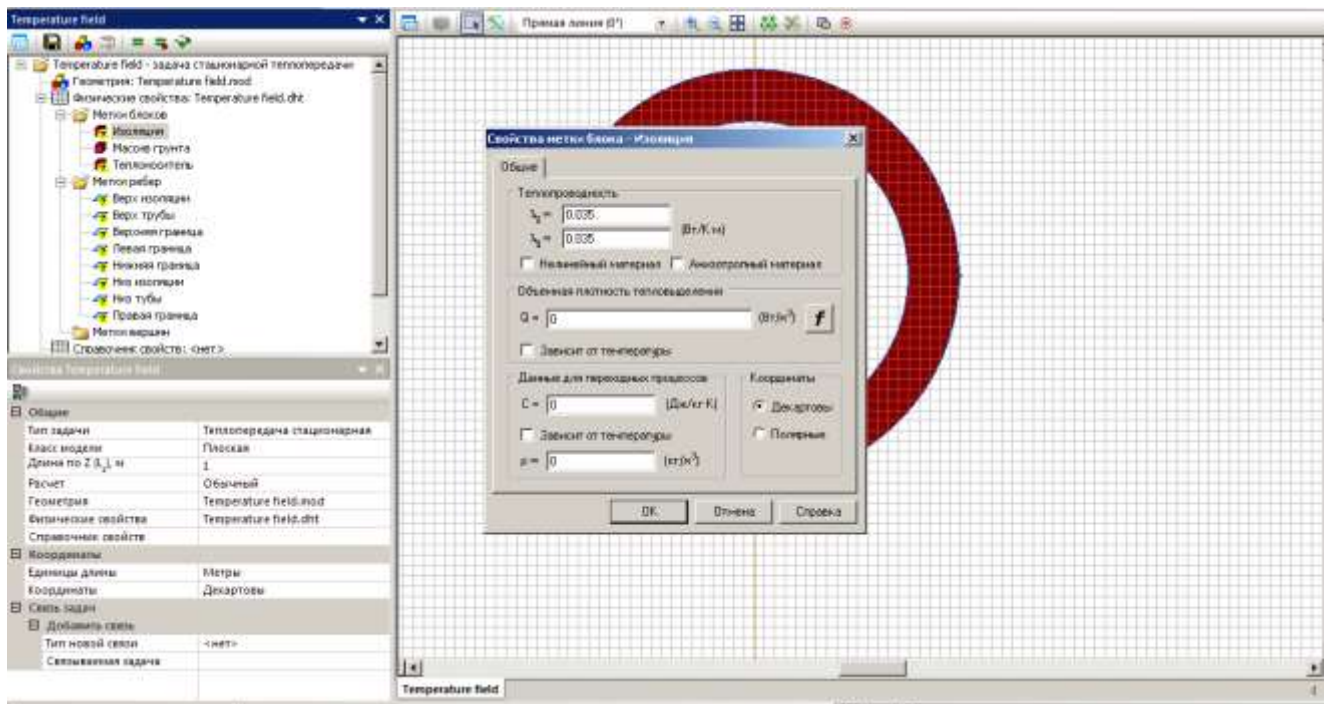


Рисунок 10. Окно свойств

Для ввода граничных условий на ребрах:

- для ребер **Верхняя** и **Нижняя граница** трубы установите флажок в окне $T=T_0$ и введите температуру теплоносителя τ из задания;
- свойства границ тепловой изоляции оставьте без изменений;
- на границе «поверхность грунта-атмосфера» установите коэффициент теплоотдачи α и температуру наружного воздуха из задания.
- для других границ блока массива грунта установите температуру грунта из задания.

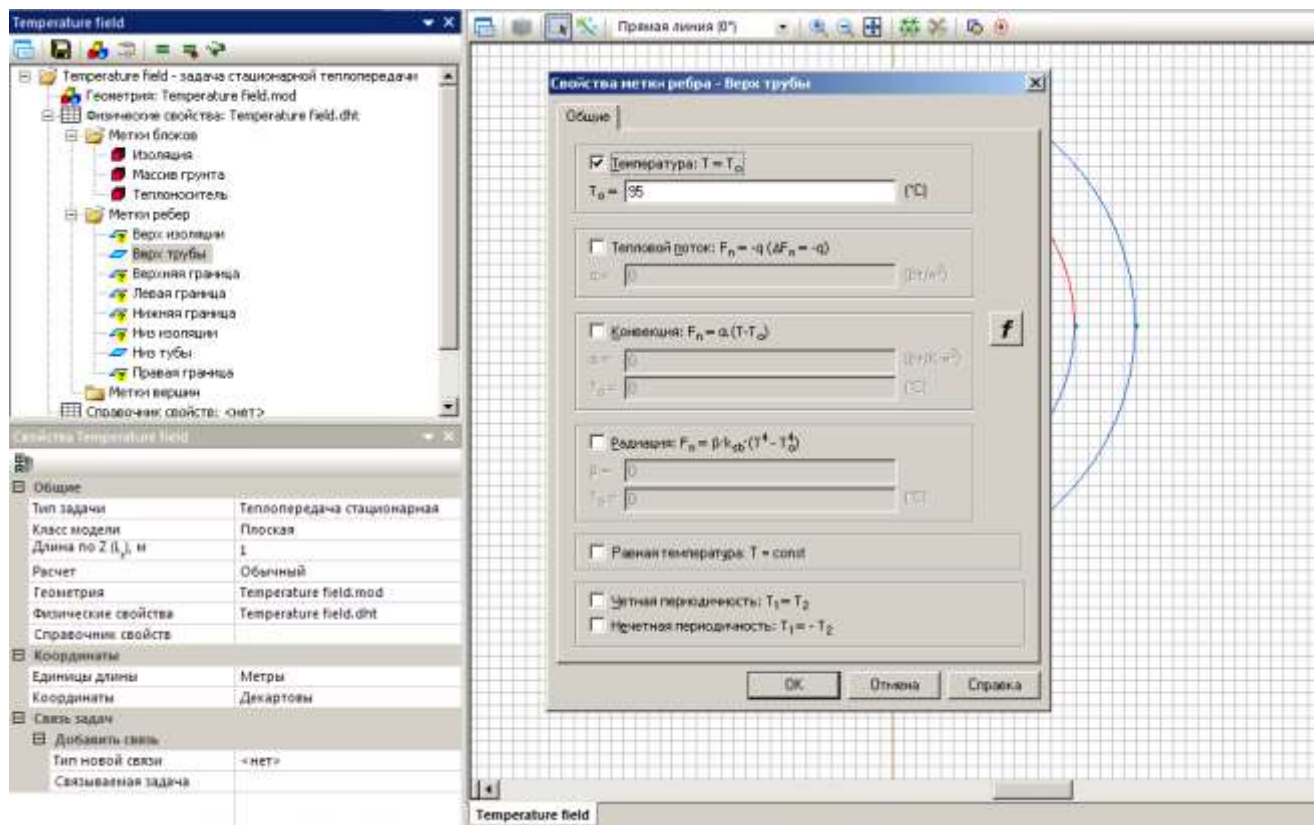


Рисунок 11. Свойства метки ребра

4.5 Построение расчетной сетки

В главном меню выберите **Правка-Построить сетку-Во всех блоках**. Будет построена расчетная сетка во всех блоках.

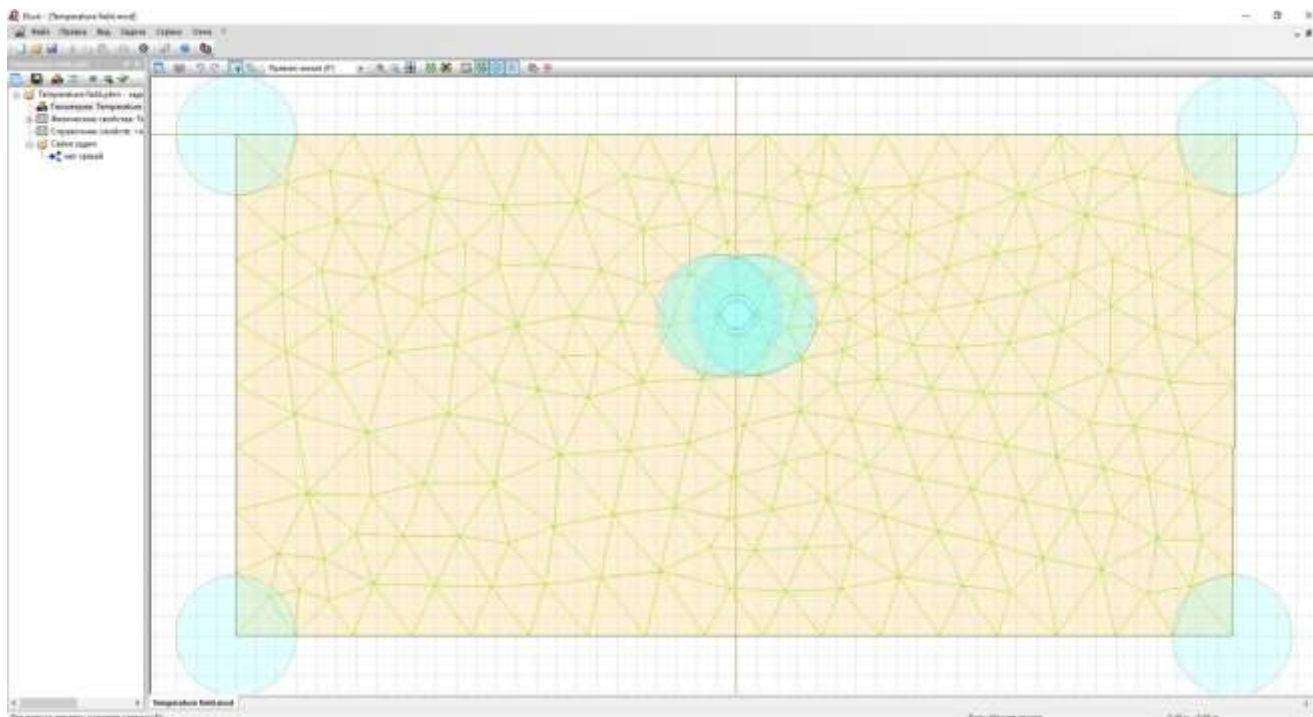


Рисунок 12. Расчетная сетка

4.6 Решение задачи

Для запуска решения:

- в главном меню выберите пункт **Решить**. После окончания расчета подтвердите просмотр результатов. На экране отобразится цветное отображение температурного поля (рисунок 13);
- нажмите кнопку **Свойства картины поля**. Установите флажки **Изотермы** и **Конечные элементы**. Отобразится температурное поле с нанесенными изотермами и конечными элементами (рисунок 15).

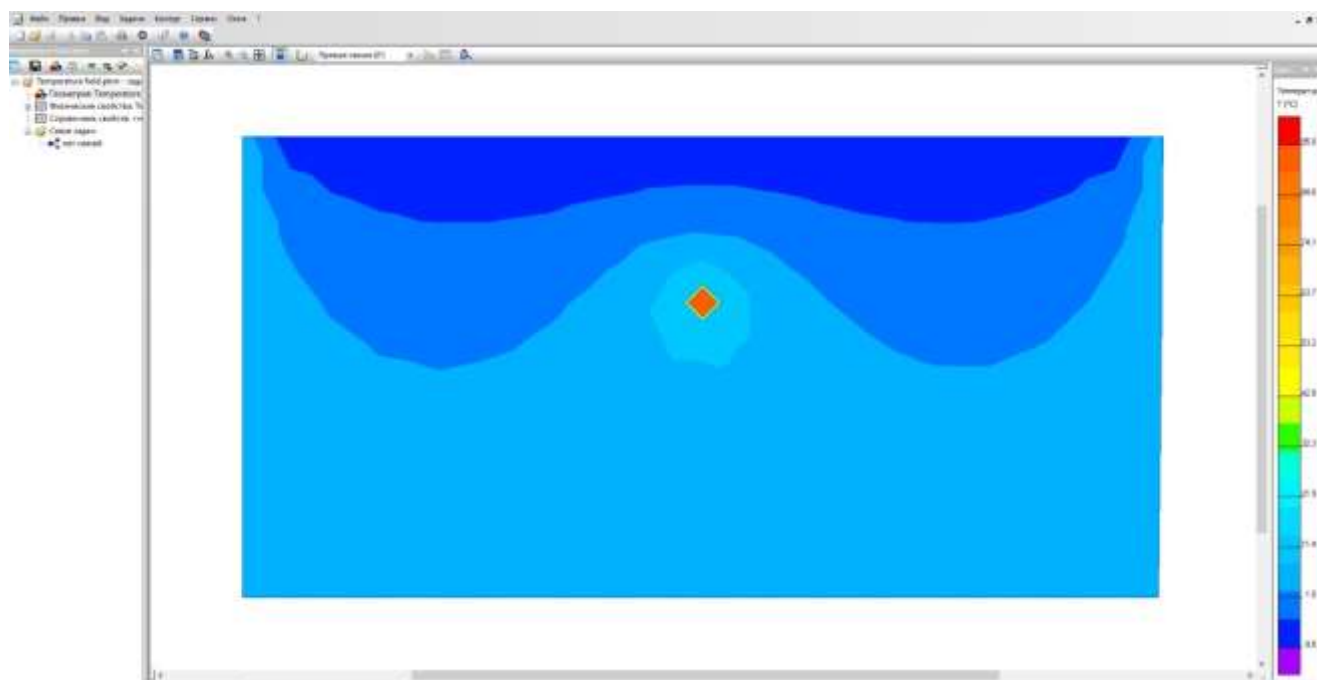


Рисунок 13. Отображение температурного поля в цвете

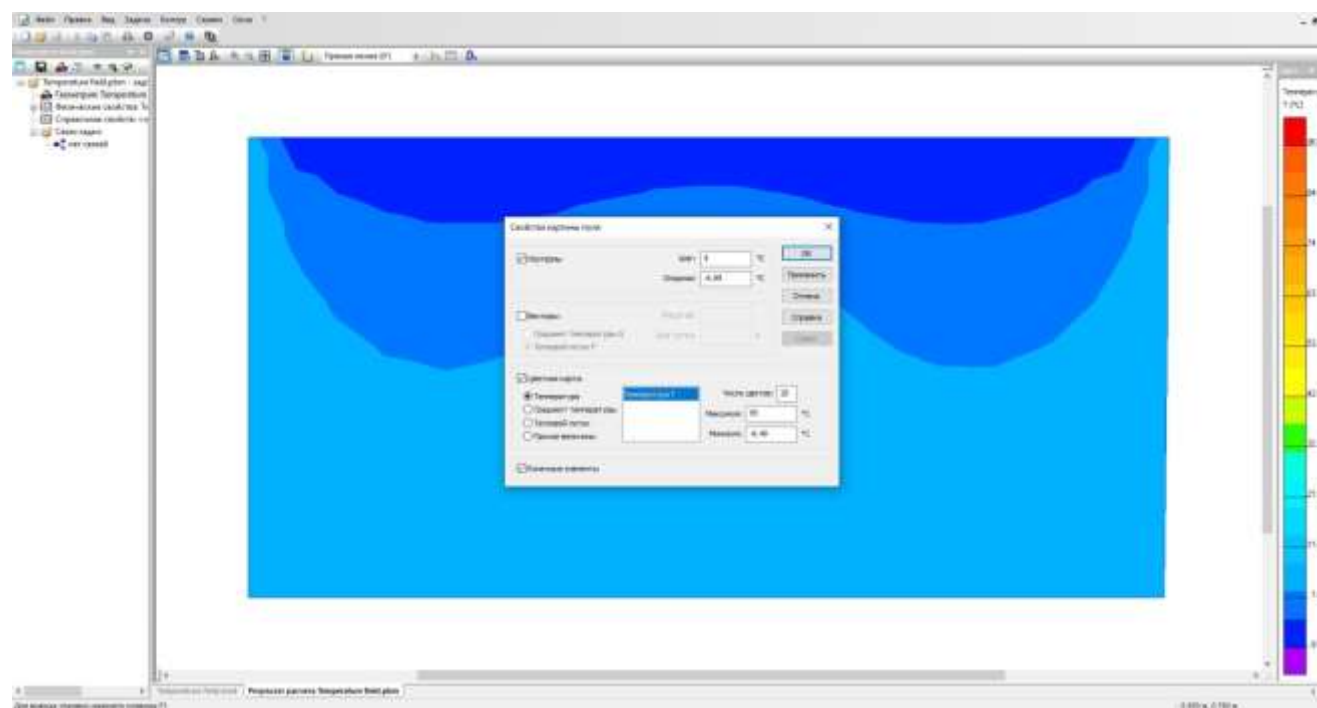


Рисунок 14. Окно свойств картины поля

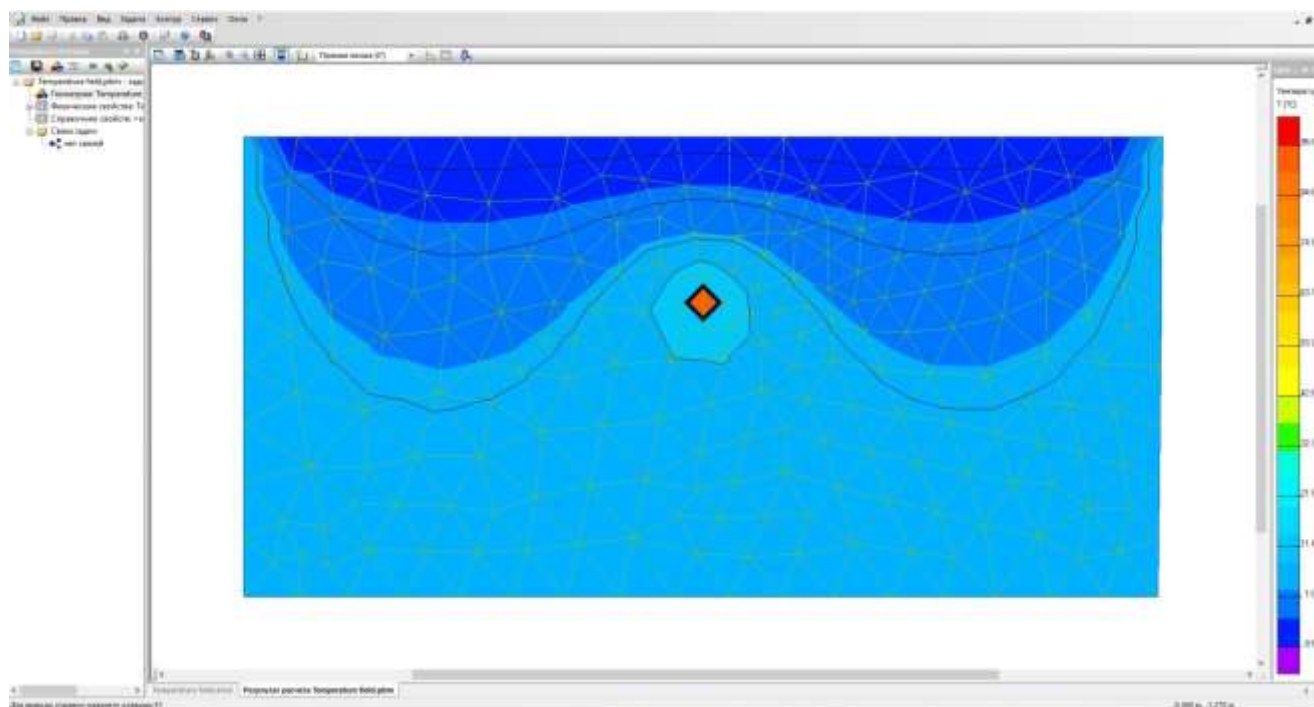


Рисунок 15. Температурное поле с изотермами и сеткой конечных элементов

4.7 Определение температуры в произвольной точке поля

Для определения температуры в произвольной точке поля нажмите кнопку **Локальные значения**. Курсором установите координаты точки в соответствии с заданием (координаты отображаются в правом нижнем углу экрана). Зафиксируйте точку нажатием ЛКМ. Локальные значения отобразятся в левой части экрана (рисунок 16).

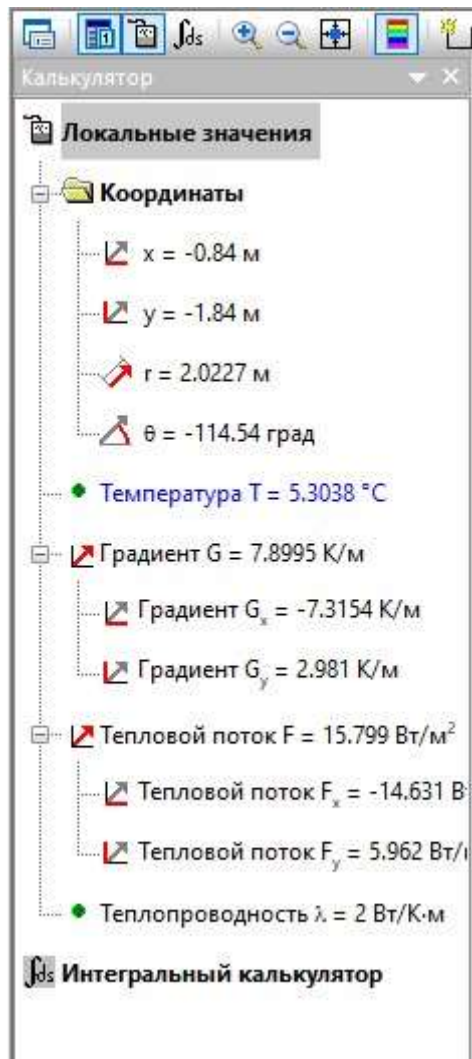


Рисунок 16. Локальные значения в произвольной точке поля

5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Тихомиров С.А., Тихомиров А.Л., Шеина С.Г. Тепловой неразрушающий метод контроля состояния строительных конструкций подземных теплопроводов// Строительные материалы. 2015. № 6.
2. Руководство пользователя ELCUT https://elcut.ru/free_doc_r.htm

Установка ELCUT

Студенческая версия ELCUT свободно загружаемая с сайта www.elcut.ru запакована в один файл - программу установки. Для установки ELCUT сохраните полученную программу установки во временную папку на вашем жестком диске. Затем найдите во временной папке программу установки и запустите её.

В левой части окна программы автозапуска расположено меню. При наведении курсора на пункт меню, в нижней части окна появляется краткое описание этого пункта. Чтобы запустить выполнение команды, связанной с выделенным пунктом меню, дважды щелкните по нему левой кнопкой мыши или нажмите на кнопку **Старт**, расположенную в правом нижнем углу.

В меню программы автозапуска присутствуют следующие действия:

- Посмотреть *ReadMe* (пункт **Введение**)
- Просмотреть руководство пользователя (пункт **Читать руководство**)
- Ознакомиться с уроками по ELCUT (пункт **Учебный класс**)
- Установить ELCUT.

Начиная работу, программа установки ELCUT предлагает просмотреть условия лицензионного соглашения. Для продолжения установки их необходимо принять. Тогда становятся доступными кнопки **Установить** и **Дополнительно**. В большинстве случаев рекомендуется нажать кнопку **Установить** для автоматической установки всех компонентов ELCUT в папку, предлагаемую по умолчанию.

Значения характеристических величин для грунта

Грунт	λ_0 Вт/мК	К Вт/м ³ К	В Вт/мК	С	g Вт/мК
Песчаный	0,32	6,4	0,116	0,005	0,000014
Супесчаный	0,40	5,2	0,014	0,012	0,000016
Глинистый	0,40	5,2	0,014	0,012	0,000016
Суглинистый	0,40	5,2	0,014	0,012	0,000016