

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 15.05.2022 01:30:23  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий, микроэлектроники,  
общей и прикладной физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 10 » 02 2022 г.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ (2 ЧАСТЬ)**  
методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки  
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2022

УДК 53

Составители: А.В. Кузько, А.П. Кузьменко, А.Е. Кузько,  
М.А. Пугачевский, А.В. Кочура, В.В. Родионов

Рецензент

Проректор по цифровой трансформации, доцент, к.т.н.

А.И. Пыхтин

**Моделирование в материаловедении (2 часть):** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Кузько А.В., Кузьменко А.П., Кузько А.Е., Пугачевский М.А., Кочура А.В., Родионов В.В. Курск, 2022. 69 с.: Библиогр.: с. 69.

Излагаются методические рекомендации по выполнению лабораторных работ для моделирования поведения материалов и визуализации полей напряжений и температур, электрического и магнитного полей технических устройств методом конечных элементов в системе автоматизированного проектирования Agros2D.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и учебного плана направления подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Предназначены для студентов всех форм обучения.

Работа выполнена в рамках реализации стратегического проекта по программе развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Юго-Западный государственный университет", в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213, ПРОЕКТ НАНО №1.7.21/3)

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 10.02.2022. Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 4,31. Уч.-изд. л. 3,7. Тираж 50 экз. Заказ 731. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### Численный расчет поля разрядника с системой электродов «сфера – диск» в Agros2D

Agros2D - это мультиплатформенное приложение C++ для решения уравнений в частных производных (PDE) на основе библиотеки Hermes2D. Основная часть программы – это пользовательский интерфейс, служащий для полной предварительной и постобработки задач (он содержит сложные инструменты для построения геометрических моделей и ввода данных, генераторы сеток, таблицы слабых форм для уравнений в частных производных и инструментов для оценки результатов, построения графиков и карт). Процессор основан на библиотеке Hermes, содержащей самые современные численные алгоритмы для монолитного и полностью адаптивного решения систем в целом нелинейных и нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) на основе hp-FEMM (адаптивный метод конечных элементов более высокого порядка точности). Обе части кода написаны на C++ [10].

Основные возможности Agros2D:

- Большой ассортимент библиотек линейной алгебры (MUMPS, UMFPACK, PETS);
- В программе присутствуют модули для расчета электростатики, электрических токов, магнитных полей, переноса тепла, механики конструкций, акустики, аэродинамики, ВЧ полей;
- Может предложить устойчивый, гармонический и переходный анализ;
- Удобный предпроцессор и мощный постпроцессор;
- Поддерживает сценарии в Python.

**Задание.** Рассчитать емкость разрядника с системой электродов «сфера – диск», находящейся в воздухе: диаметр сферы 20 см, диаметр диска 40 см, а толщина 5 см, если на сферу подан потенциал 1000 В, а на диск – 0 В. Центр сферы находится над серединой диска на расстоянии 25 см от его поверхности.

#### Порядок выполнения работы

1. Запустить программное обеспечение Agros2D
2. В открытом окне нажать на кнопку  (новый).
3. В появившемся диалоговом окне выбрать «Electrostatic field»
4. Далее меняем тип координат с планарного на осесимметричный  
 Тип координат:
5. Выбираем на панели инструментов кнопку  «Предпроцессор»

6. На сетке координат с помощью команды «alt+N» ставим точки с координатами (рис. 9.1).

Граница области моделирования:

[0; -0.55]

[0.55; 0]

[0; 0.55]

Нижняя пластина:

[0; -0.15]

[0.2; -0.15]

[0.2; -0.1]

[0; -0.1]

Верхняя сфера:

[0; 0.05]

[0; 0.25]

[0.1; 0.15]

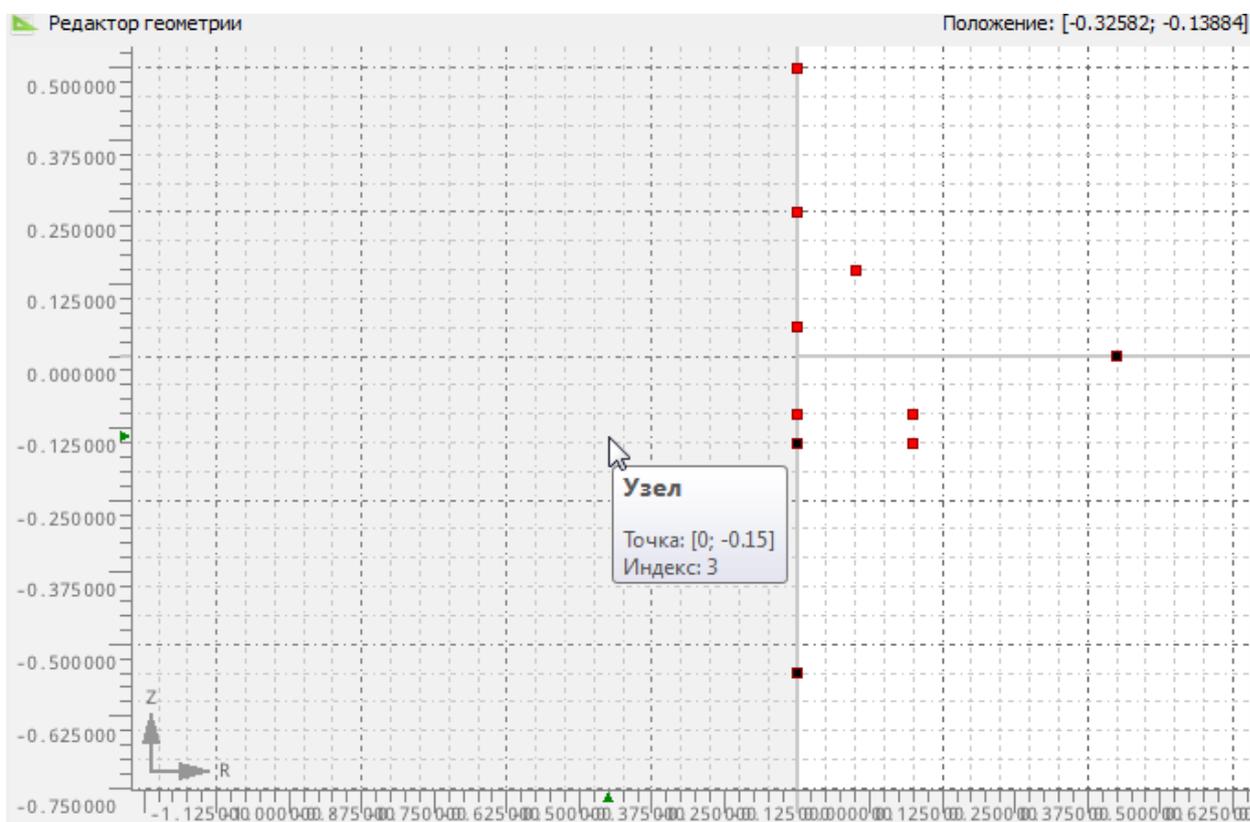


Рисунок 9.1 – Сетка с расставленными точками.

7. Далее используя инструмент «работа над ребрами»  соединяем полученные точки (при помощи ctrl+ЛКМ) чтобы получилось как на рисунке 9.2.

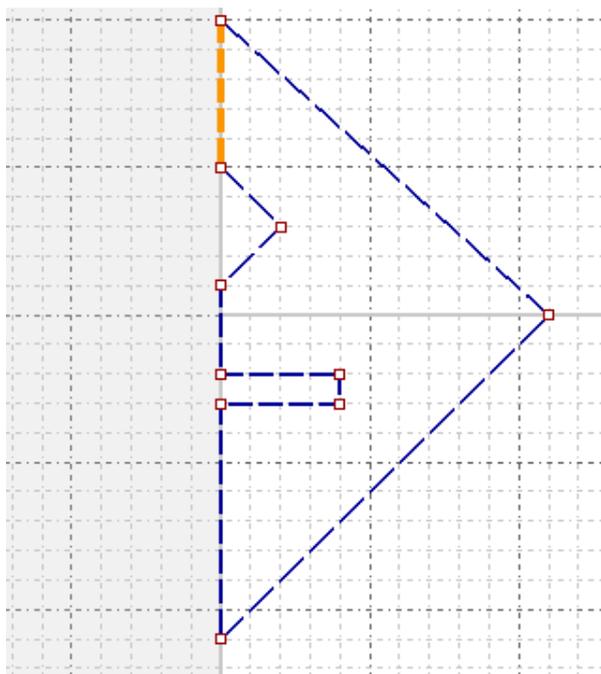


Рисунок 9.2 – Первичное изображение.

8. Нажимая на ребро двойным нажатием ЛКМ, задаем и в появившемся меню угол в 90 градусов. Делаем это для ребер выделенными черным цветом (рис. 9.3).

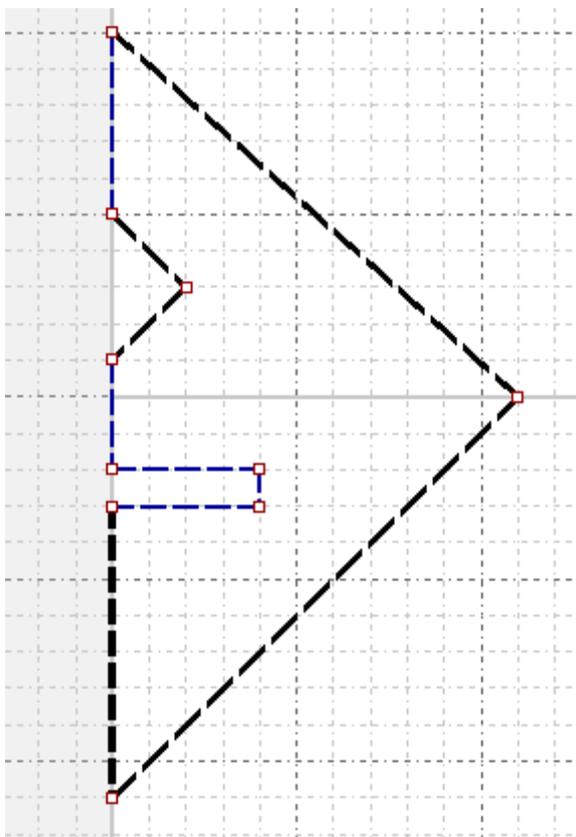


Рисунок 9.3 – Выделенные ребра

Получается изображение как на рисунке 9.4.

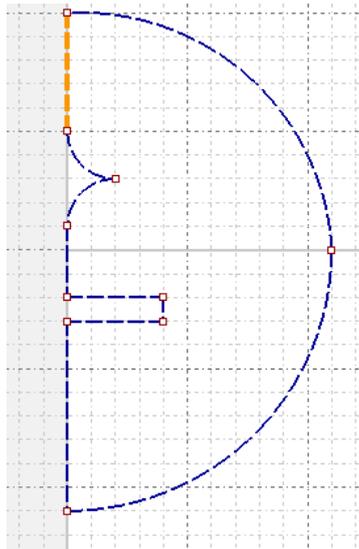


Рисунок 9.4 – Изображение полученных дуг

9. Для ребер соединенными узлом [0.1; 0.15] нужно поменять направления, для этого двойным нажатием ЛКМ на нужное нам ребро появляется меню, в котором мы нажимаем кнопку «сменить направление» и нажимаем «ок» в итоге получаем изображение как на рисунке 9.5.

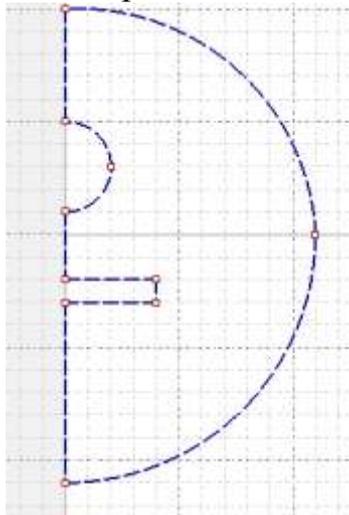


Рисунок 9.5 – Исправления «неправильных» дуг

10. Нажимаем кнопку «работа над метками»  и ставим метку во внутрь получившейся фигуры (Ctrl+ЛКМ)

11. С помощью команды Alt+В (также можно вызвать данное меню нажав ПКМ в белую область слева сверху рабочего пространства и выбрав пункт «new boundary condition») вызываем контекстное меню «граничное условие» и задаем имя «напряжение»

12. Опять вызываем граничное условие и меняем параметры как показано на рисунке 9.6

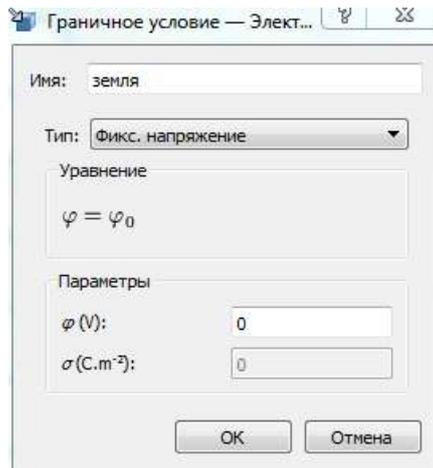


Рисунок 9.6 – Контекстное меню.

13. Опять вызываем граничное условие и меняем параметры как показано на рисунке 9.7

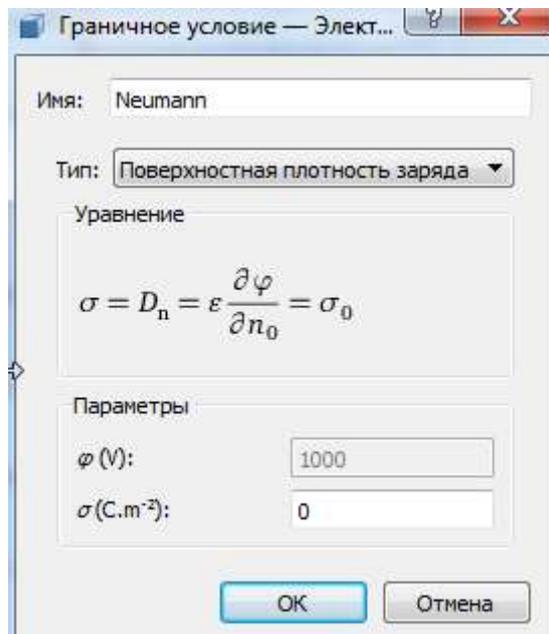


Рисунок 9.7 – Контекстное меню

14. С помощью команды Alt+M вызываем контекстное меню «материал» и меняем параметры как на рисунке 9.8.

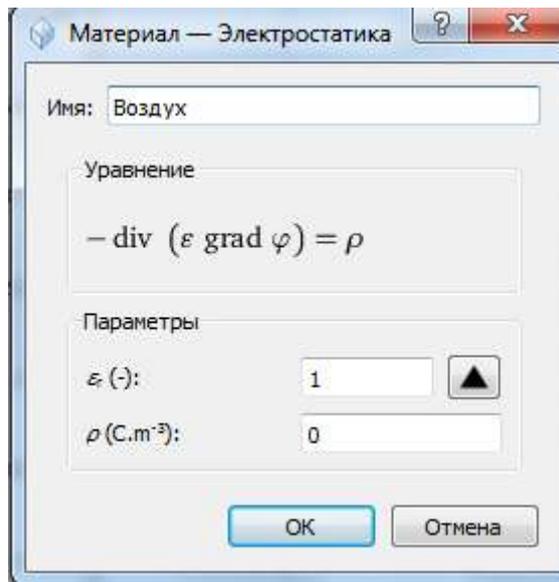


Рисунок 9.8 –Добавление воздуха в меню нового материала

15. Нажимаем кнопку «Работа над метками»  и двойным нажатием ЛКМ жмём внутри фигуры, всплывает контекстное окно. В нем в графе материал выбираем «Воздух».

16. Выбираем инструмент «Работа над ребрами» и выделяем 2 ребра как показано на рисунке 9.9. После нажимаем «Пробел» и в появившемся меню ставим граничные условия «Напряжение».

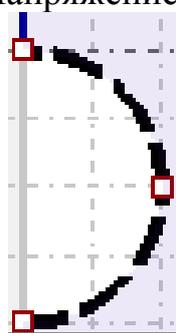


Рисунок 9.9 – Выделенные ребра

17. Выделяем 3 ребра как показано на рисунке 9.10, после нажимаем пробел и в появившемся меню ставим граничные условия «Земля».

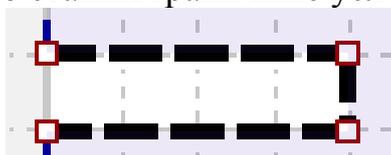


Рисунок 9.10 – Выделенные ребра

18. Выделяем оставшиеся ребра, которые мы ещё не выделяли, нажимаем пробел и в появившемся окне ставим граничные условия «Neumann».

19. Нажимаем на кнопку «Mesh area» 

20. Нажимаем на кнопку «Свойства» . Далее нажимаем на кнопку «электростатика». В открывшемся окне ставим параметры сетки как показано на рисунке 9.11.

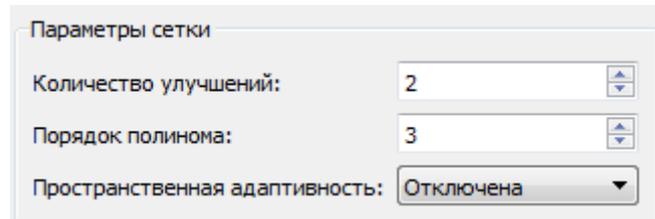


Рисунок 9.11 – Параметры сетки.

21. Нажимаем на кнопку «Mesh area» 

22. Нажимаем на кнопку «Solve» 

После проделанных операций получается распределение электрического потенциала в зазоре, затем меняем рассматриваемую характеристику электрического поля на напряженность. (рисунок 9.12)

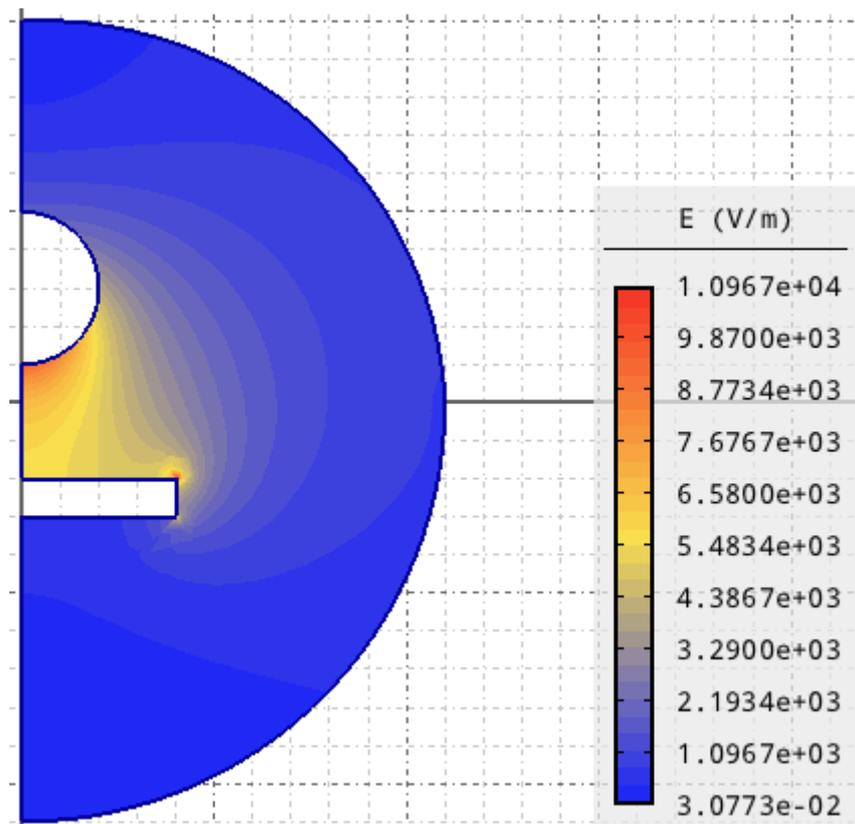


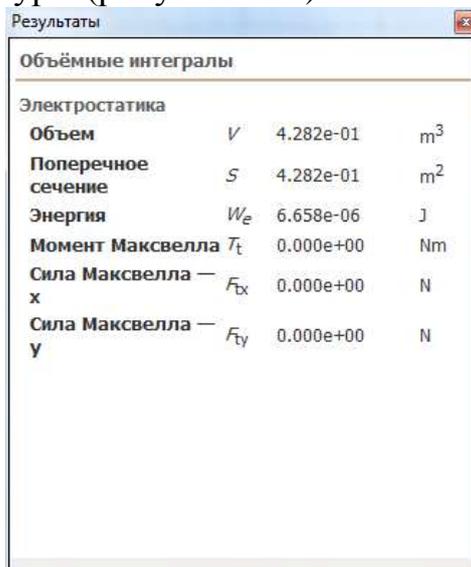
Рисунок 9.12 – Распределение электрического поля искрового разрядника.

### Расчеты в Agros2D. Консоль

Нужно показать результаты, полученные при моделировании.

Нажимаем на иконку «Поверхностные интегралы» и выделяем маленький полукруг фигуры, затем нажимаем на Вид, далее «Панели» и выбираем «Результаты» и консоль.

В окне результатов можно видеть значения, полученные при моделировании данной фигуры (рисунок 9.13).



| Объёмные интегралы |          |           |       |
|--------------------|----------|-----------|-------|
| Электростатика     |          |           |       |
| Объем              | $V$      | 4.282e-01 | $m^3$ |
| Поперечное сечение | $S$      | 4.282e-01 | $m^2$ |
| Энергия            | $W_e$    | 6.658e-06 | J     |
| Момент Максвелла   | $T_i$    | 0.000e+00 | Nm    |
| Сила Максвелла — x | $F_{ix}$ | 0.000e+00 | N     |
| Сила Максвелла — y | $F_{iy}$ | 0.000e+00 | N     |

Рисунок 9.13 – Полученные результаты

Для того чтобы проверить подлинность данных результатов мы должны с помощью консоли рассчитать емкость двумя методами, и по итогу они должны быть численно равны. Поэтому в консоли рассчитываем емкость по двум формулам: через заряд и через энергию, как показано на рисунке 9.14, значения, получившиеся по данным формулам, сходятся, из этого равенства можно сделать вывод, что программное обеспечение Agros2D выдает верные результаты

```

2.7.6 (default, Nov 10 2013, 19:24:18) [Python 2.7.6]
win32

>>> Q = 1.331e-08

>>> C = Q*2/1000
<type 'exceptions.IndentationError'>
unexpected indent (<string>, line 1)
Stacktrace:

>>> Q = 1.331e-08*2

>>> C=Q/1000

>>> Q
2.662e-08

>>> C
2.662e-11

>>> We = 6.658e-06*2

>>> C = We*2/1e+6

>>> C
2.6631999999999997e-11

>>> |

```

Рисунок 9.14 – Результаты проверки через консоль

## Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Agros2D.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: диаметр сферы 10 см, диаметр диска 20 см, а толщина 2 см, если на сферу подан потенциал 100 В, а на диск – 0 В. Центр сферы находится над серединой диска на расстоянии 20 см от его поверхности. Диэлектрик между пластинами – воздух.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### Расчет заряда системы электродов, состоящих из двух сфер в Agros2D, сравнение характеристик, полученных в FEMM

**Задание.** Рассчитать и визуализировать поле следующей системы.

Система состоит из двух проводящих сфер, расположенных одна над другой в воздухе, на верхнюю подан потенциал 100 В, на нижнюю – -100 В. Расстояние между центрами сфер 70 м, радиусы сфер одинаковы равны 25 м (рисунок 10.1).

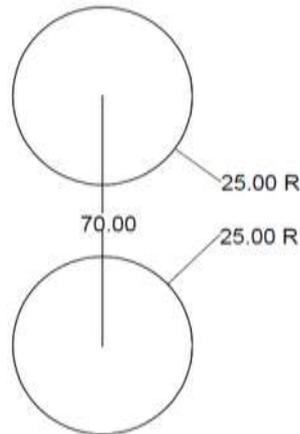


Рисунок 10.1 – Две проводящие сферы

1. Запустить программное обеспечение Agros2D.
2. В открытом окне нажать на кнопку  (новый).
3. В появившемся диалоговом окне выбрать «electrostatic field» .
4. Далее меняем тип координат с планарного на осесимметричный.

Тип координат:

5. Выбираем на панели инструментов кнопку  «техпроцессор»
6. Поместите узлы в  $(r,z) = (0,0), (300,0), (150,150), (125,35), (150,60), (175,35), (150,10)$  (помещайте узлы с помощью комбинации Alt+N).

7. Далее используя инструмент «Работа над ребрами»  соединяем полученные точки ( при помощи Ctrl+ЛКМ) чтобы получилось как на рисунке 10.2.

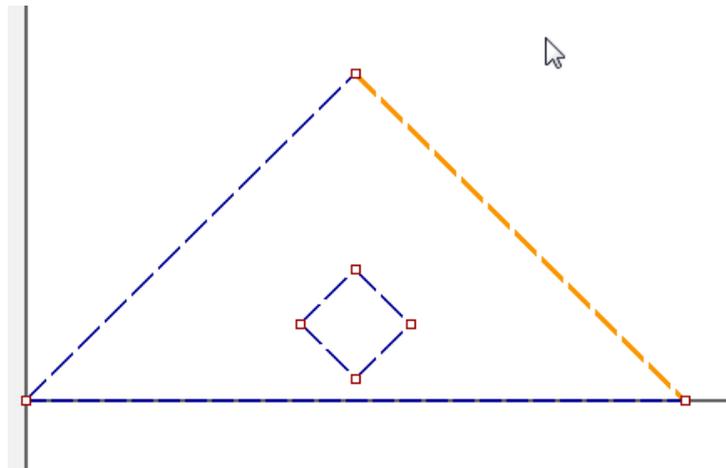


Рисунок 10.2 – Создание визуальной модели

8. Делаем дуги, для этого .нажимаем на ребро двойным нажатием ЛКМ, задаем и в появившемся меню угол в 90 градусов. , должен получится круг находящийся в полукруге ,если дуги идут в другую сторону в контекстном меню нажимаем «сменить направление».

9 . Нажимаем кнопку «работа над метками»  и ставим метку во внутрь круга и полукруга.

10. добавим 3 граничащих условия. Вызываем меню нажав ПКМ в белую область слева сверху рабочего пространства и выбрав пункт «new boundary condition» и выставляем значения как показано на рисунке 10.3.

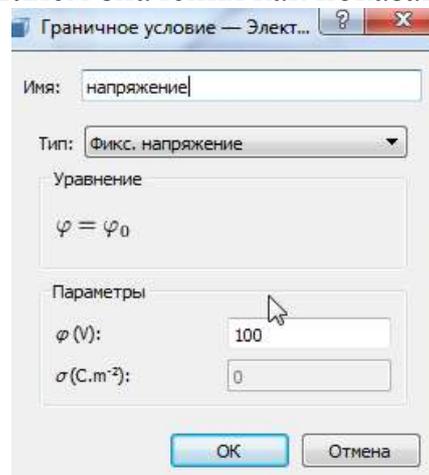


Рисунок 10.3 – Контекстное меню

11. С помощью команды Alt+M вызываем контекстное меню «материал» и меняем параметры как на рисунке 10.4.

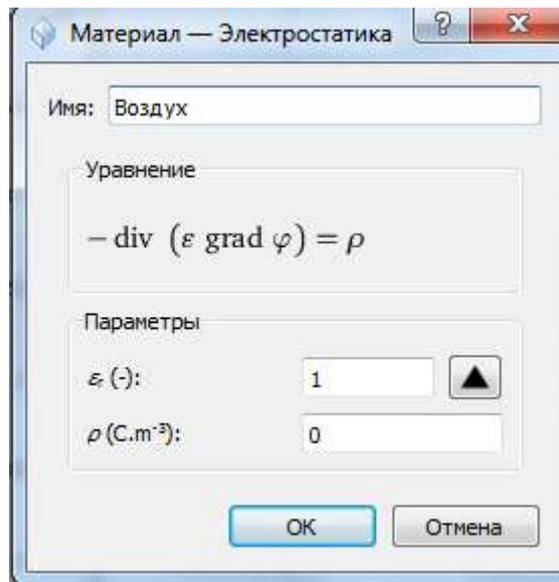


Рисунок 10.4 – Значения для воздуха

12. Нажимаем кнопку «работа над метками»  и двойным нажатием лкм жмём внутри полукруга, всплывает контекстное окно. В нем в графе материал выбираем «воздух».

13. Выбираем инструмент «работа над ребрами» и выделяем дуги полукруга, после нажимаем пробел и в появившемся меню ставим граничные условия «Neumann».

14. Аналогично выделяем круг и ставим граничное условие напряжение.

15. Точно также выбираем ребро (0.0) –(300.0) и ставим граничное условие «земля».

16. Нажимаем на кнопку «Mesh area» .

17. Нажимаем на кнопку «Свойства» . Дальше нажимаем на кнопку «электростатика». В открывшемся окне ставим параметры сетки как показано на рисунке 10.5.

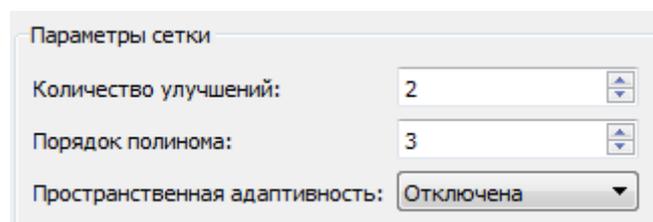


Рисунок 10.5 – Параметры сетки.

18. Нажимаем на кнопку «Mesh area» .

19. Нажимаем на кнопку «Solve» .

20. Далее меняем в меню «скалярное поле» как показано на рисунке 10.6.

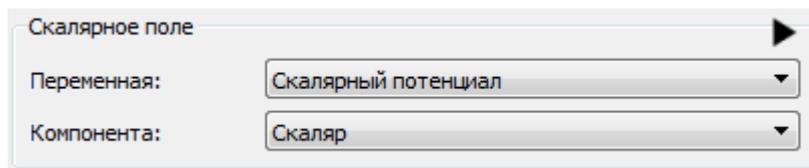


Рисунок 10.6 – Выбор компонентов

И получаем следующее изображение рисунок 10.7.

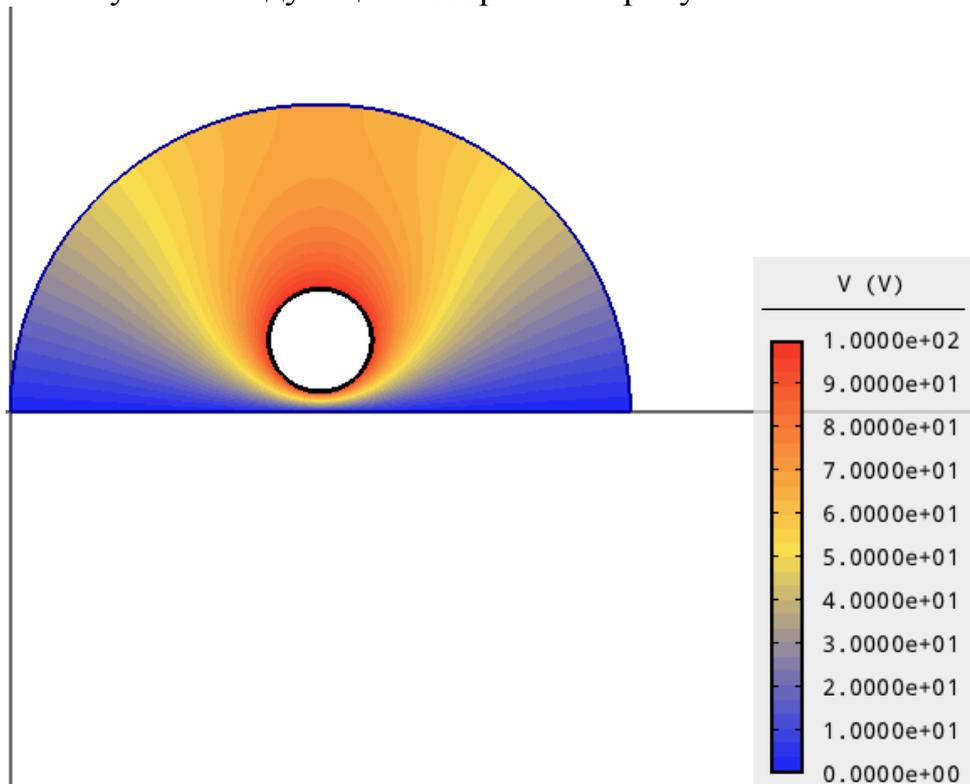


Рисунок 10.7 – Распределение скалярного потенциала

Таким образом была получена модель, которая имеет небольшие различия с аналогичной моделью из FEMM.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Agros2D.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: на верхнюю сферу подан потенциал 50 В, на нижнюю – -50 В. Расстояние между центрами сфер 50 м, радиусы сфер одинаковы равны 10 м

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### Визуализация электрического поля конденсатора из двух дисков с учетом краевых эффектов в Agros2D

Система состоит из двух проводящих дисков, расположенных один над другим в воздухе на расстоянии 1,5 мм. Диаметр дисков составляет 12 мм, толщина 0,4 мм. На верхний диск подан потенциал 1500 В. Рассчитать заряд верхнего диска.

Создание модели. Запустите Agros 2D в разделе меню «Пуск». После запуска программы на верхней панели нажмите *Файл*, затем создайте *Новый*. В появившемся диалоговом окне выберите поле  *Electrostatic field*. Нажмите *Ok*. В настройках свойств укажите тип координат: *Осесимметричный*, тип сетки: *Triangle – треугольная*.

После создания необходимых свойств перейдите во вкладку *Перепроцессор*. Для создания геометрии модели выберите инструмент *Работа с узлами* (на панели инструментов ) и поместите 10 узлов (например, (0;0), (0;0,0004), (0;0,0019), (0;0,0023), (0,006;0), (0,006;0,0004), (0,006;0,0019), (0,006; 0,0023), (0,01; 0,00115), (0;0,0112), (0;-0,00885)). Это эскиз 1/2 сечения конденсатора. Узлы можно размещать, щелкнув левой кнопкой мыши в нужное место, одновременно зажав клавишу *Ctrl*, или нажимая сочетание клавиш *Alt+N* и вручную вводя координаты точки через всплывающее диалоговое окно.

Выберите инструмент *Работа с линиями* (на панели инструментов ). Соедините все узлы, одновременно зажав клавишу *Ctrl*. Получившаяся геометрия модели изображена на рисунке 11.1.

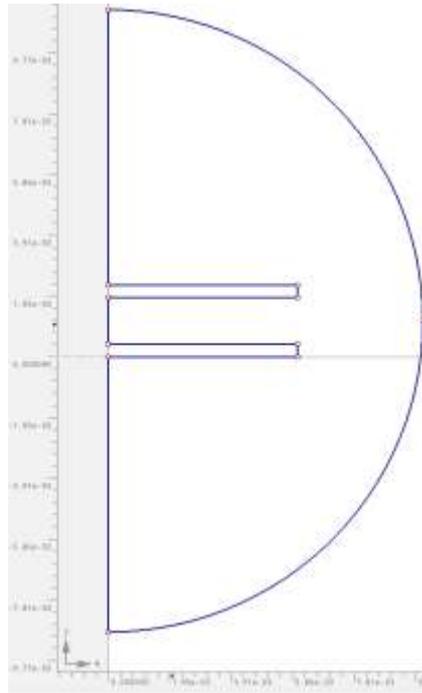


Рисунок 11.1 – Геометрия модели

Для задания материалов модели воспользуйтесь сочетанием клавиш *Alt+M* или щёлкните правой кнопкой мыши в левой верхней квадратной области (*New material*). В появившемся диалоговом окне измените имя материала на *Air*. По умолчанию диэлектрическая проницаемость нового материала равна 1, что и соответствует воздуху. Нажмите кнопку *Ok*, чтобы завершить создание материала.

Теперь выберите инструмент *Работа с метками* (на панели инструментов ) и поместите метку блока как показано на рисунке 11.2. Как и точки узлов, метки блоков могут быть размещены либо щелчком левой кнопки мыши, с одновременным нажатием *Ctrl*, либо в диалоговом окне *Alt+L*.

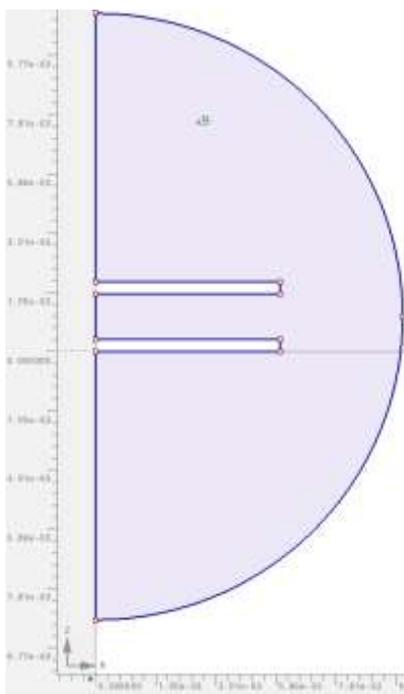


Рисунок 11.2 – Расположение метки

Щелкните левой кнопкой мыши на узле метки блока, чтобы узел стал темным, что означает, что он выбран. Нажмите пробел, чтобы открыть метку выбранного блока. Появится диалоговое окно, содержащее свойства, назначенные выбранной метке. Измените материал на *Air*.

Теперь необходимо задать граничные условия. Для задания граничных условий воспользуйтесь сочетанием клавиш *Alt+B* или щёлкните правой кнопкой мыши в левой верхней квадратной области (*New boundary condition*). В появившемся диалоговом окне измените *имя* на *Нижний диск*, тип – *фиксированное напряжение*. Введите 0В в качестве значения в соответствующем поле редактирования и нажмите *Ok*.

Повторите вышеуказанный процесс, но вместо этого назовите новое граничное условие *Верхний диск* (положительный электрод), введите заданное значение напряжения 1500В и примените.

Также создайте условие, но теперь назовите новое граничное условие *Заряд* и выберите тип: *Поверхностная плотность заряда*. Введите значение 0 Кл\*м<sup>-2</sup>.

Выберите инструмент *Работа с линиями* на панели инструментов, затем щелкните левой кнопкой мыши по каждому сегменту верхнего диска (рисунок 11.3). Когда сегмент становится черным, вы выбрали его. Теперь нажмите пробел, и в появившемся окне из выпадающего списка выберите *Верхний диск*.

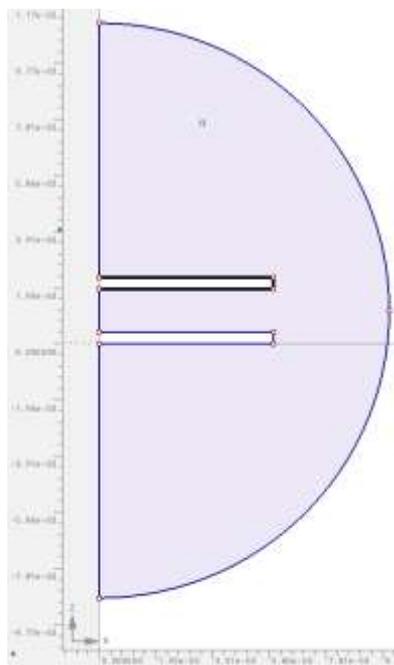


Рисунок 11.3 – Граничные условия для верхнего диска

Повторите этот процесс для нижнего диска, но установите тип проводника на *Нижний диск*. Для оставшихся незадаанных границ задайте граничное условие *Заряд*.

Теперь перейдите во вкладку *Mesh area*. Это действие создаст треугольную сетку (рисунок 11.4).

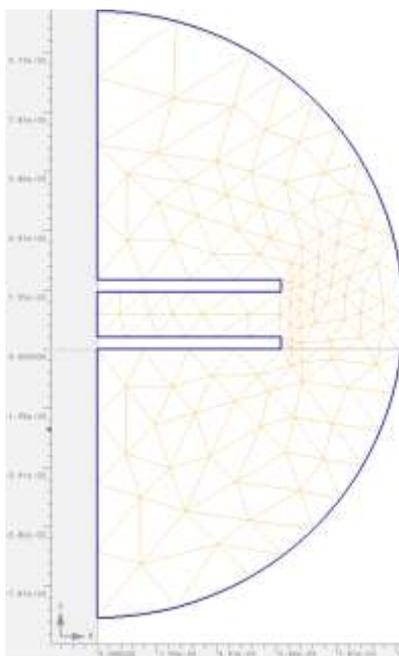


Рисунок 11.4 – Генерация сетки

Когда сетка построена, нажмите *Solve* чтобы открыть решение в окне постпроцессора (рис. 11.5).

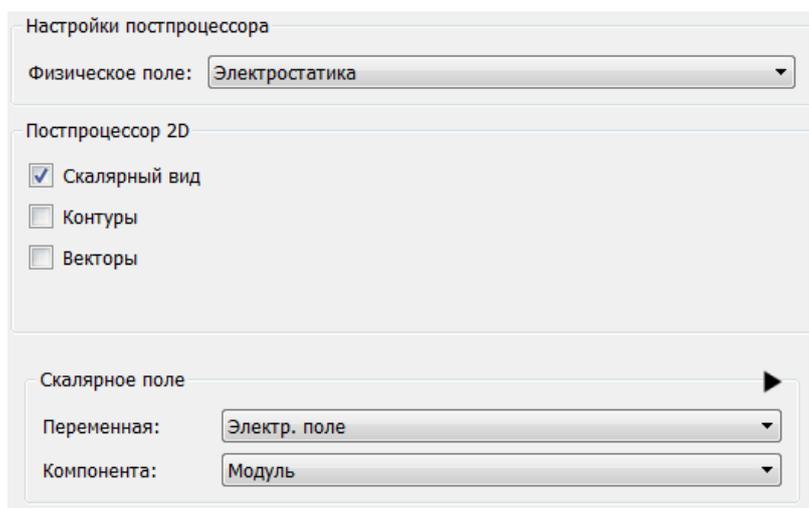


Рисунок 11.5 – Настройки постпроцессора

Теперь по умолчанию при запуске постпроцессора поле визуализируется с помощью цвета. Решение будет отображено, как показано на рисунке 11.6.

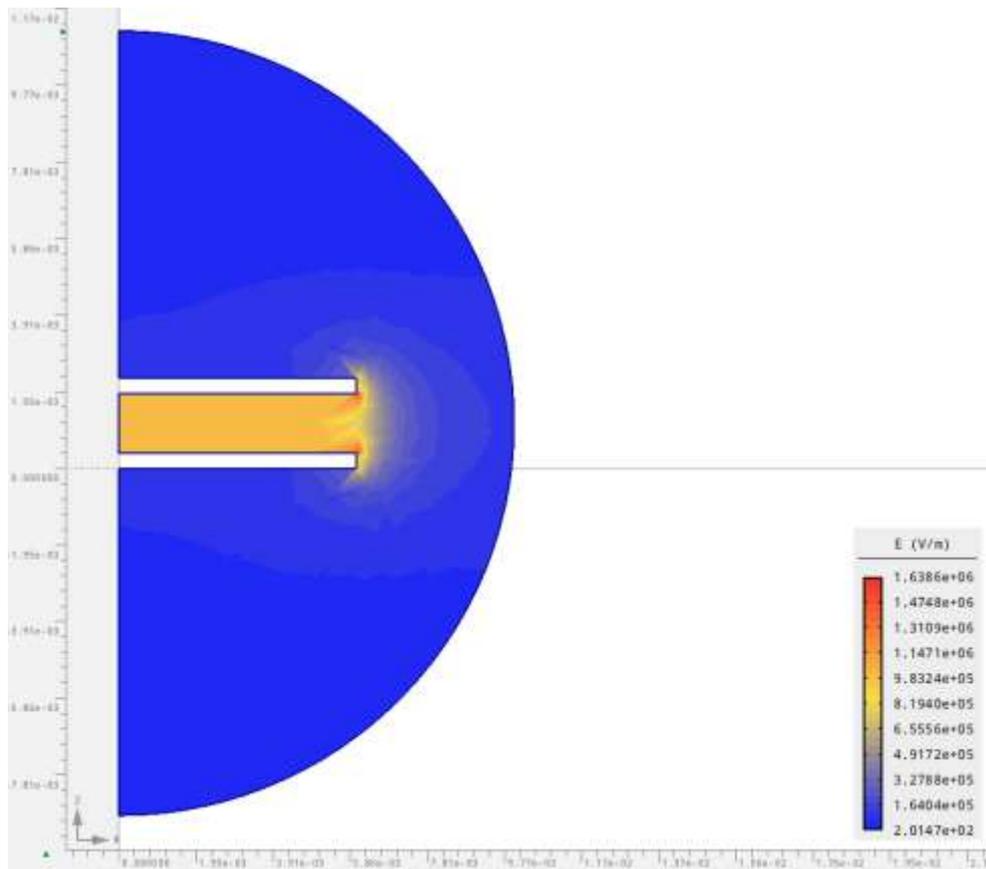


Рисунок 11.6 – Визуализация поля

Заряд на каждом проводнике можно определить, выбрав инструмент *Поверхностные интегралы* (на панели инструментов ) , а затем *Выбрать по метке*  в выпадающем списке *Верхний диск*. Затем появится диалоговое окно, которое отображает характеристики для каждого определенного проводника. Для проводника *Верхний диск* зарегистрированный заряд составляет  $1,285 \cdot 10^{-9}$  Кл (рисунок 11.7).

| Результаты                     |                 |           |                |
|--------------------------------|-----------------|-----------|----------------|
| <b>Поверхностные интегралы</b> |                 |           |                |
| <b>Электростатика</b>          |                 |           |                |
| Длина                          | /               | 1.240e-02 | m              |
| Поверхность                    | S               | 2.413e-04 | m <sup>2</sup> |
| Заряд                          | Q               | 1.285e-09 | C              |
| Момент Максвелла               | T <sub>m</sub>  | 0.000e+00 | Nm             |
| Сила Максвелла — x             | F <sub>tx</sub> | 0.000e+00 | N              |
| Сила Максвелла — y             | F <sub>ty</sub> | 1.230e-03 | N              |

Рисунок 11.7 – Результаты

Поскольку мы рассматривали только 1/2 сечения конденсатора, то для того, чтобы узнать заряд на всем верхнем диске, следует полученное значение заряда умножить на 2. Заряд верхнего диска равен  $2,57 \cdot 10^{-11}$  Кл.

### **Задания**

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Agros2D.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: расстояние между дисками 2 мм. Диаметр дисков составляет 20 мм, толщина 1 мм. На верхний диск подан потенциал 1000 В. Рассчитать заряд верхнего диска.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### Визуализация и определение параметров поля соленоида с сердечником в Agros2D, сравнение характеристик, полученных в FEMM

Для вычисления магнитного поля соленоида с сердечником необходимо создать модель в программном обеспечении Agros2D. Запуск программы осуществляется, выбрав соответствующий пункт, размещенный в разделе меню «Пуск». Создайте новый документ и в появившемся диалоговом окне выберите тип создаваемого поля. Для решения поставленной выше задачи надо выбрать «Magnetic field» из списка предлагаемых полей (рисунок 12.1).



Рисунок 12.1 – Выбор поля

После выбора поля необходимо нажать на вкладку «Свойства», где задаются общие параметры задачи.

В первую очередь выбирается тип координат и тип сетки, как показано на рисунке 12.2.

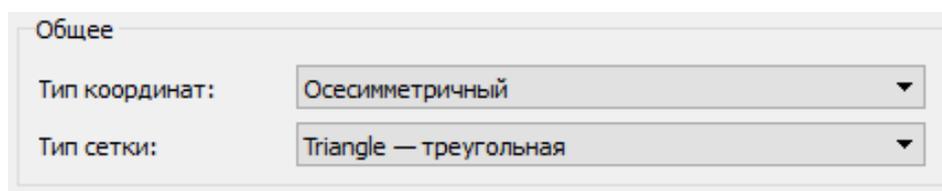


Рисунок 12.2 – Общие параметры задачи

После проделанных манипуляций нажимается кнопка «Магнитное поле», после чего появится диалоговое окно (рис. 12.3), где задаются остальные параметры.

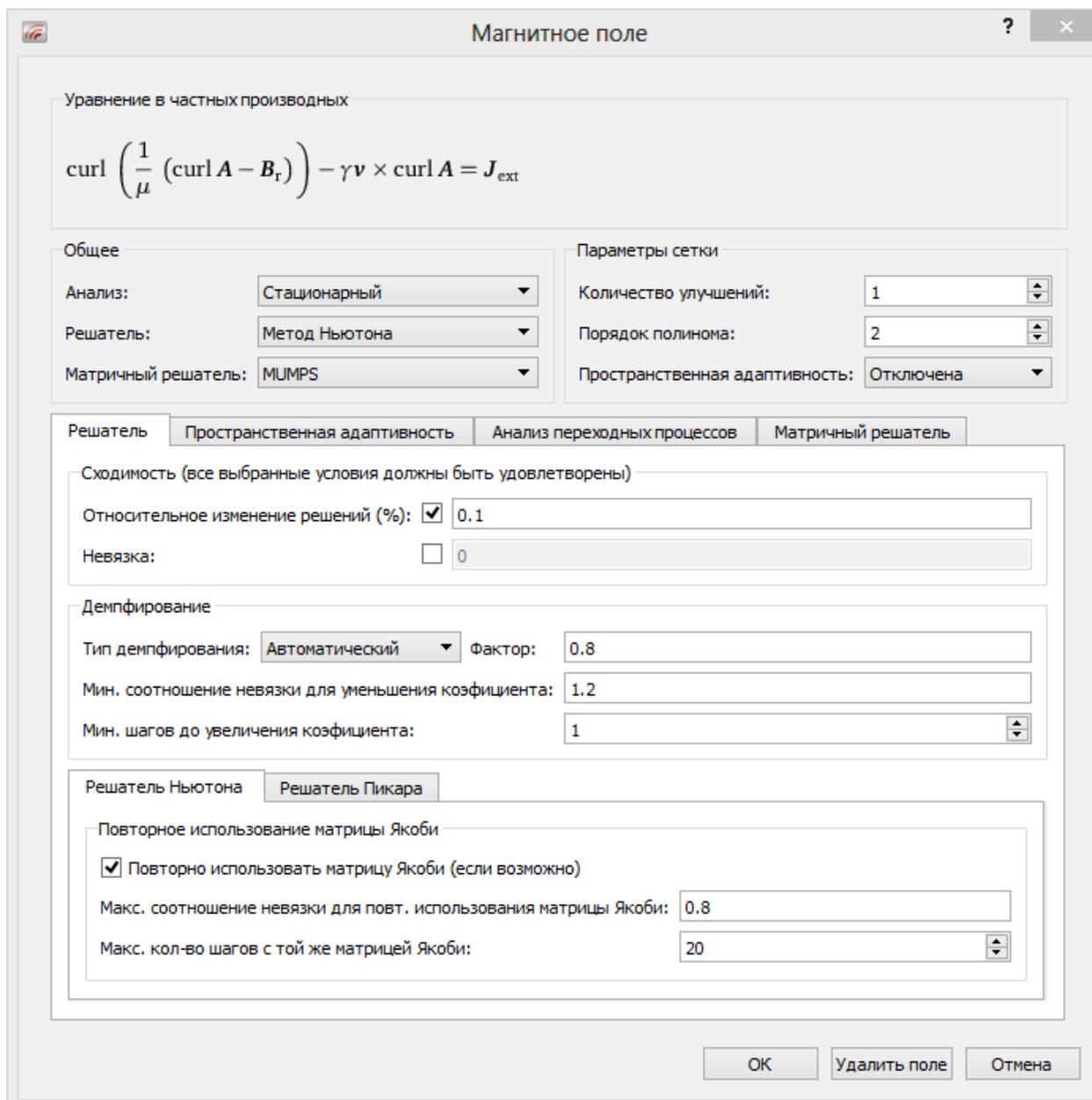


Рисунок 12.3 – Основные параметры задачи

После задания параметров переходим во вкладку «Препроцессор», в рабочем поле которого создадим соленоид с сердечником. Для этого поставим девять точек, как показано на рисунке 12.4, выбрав инструмент «узел» и зажав клавишу «Ctrl».

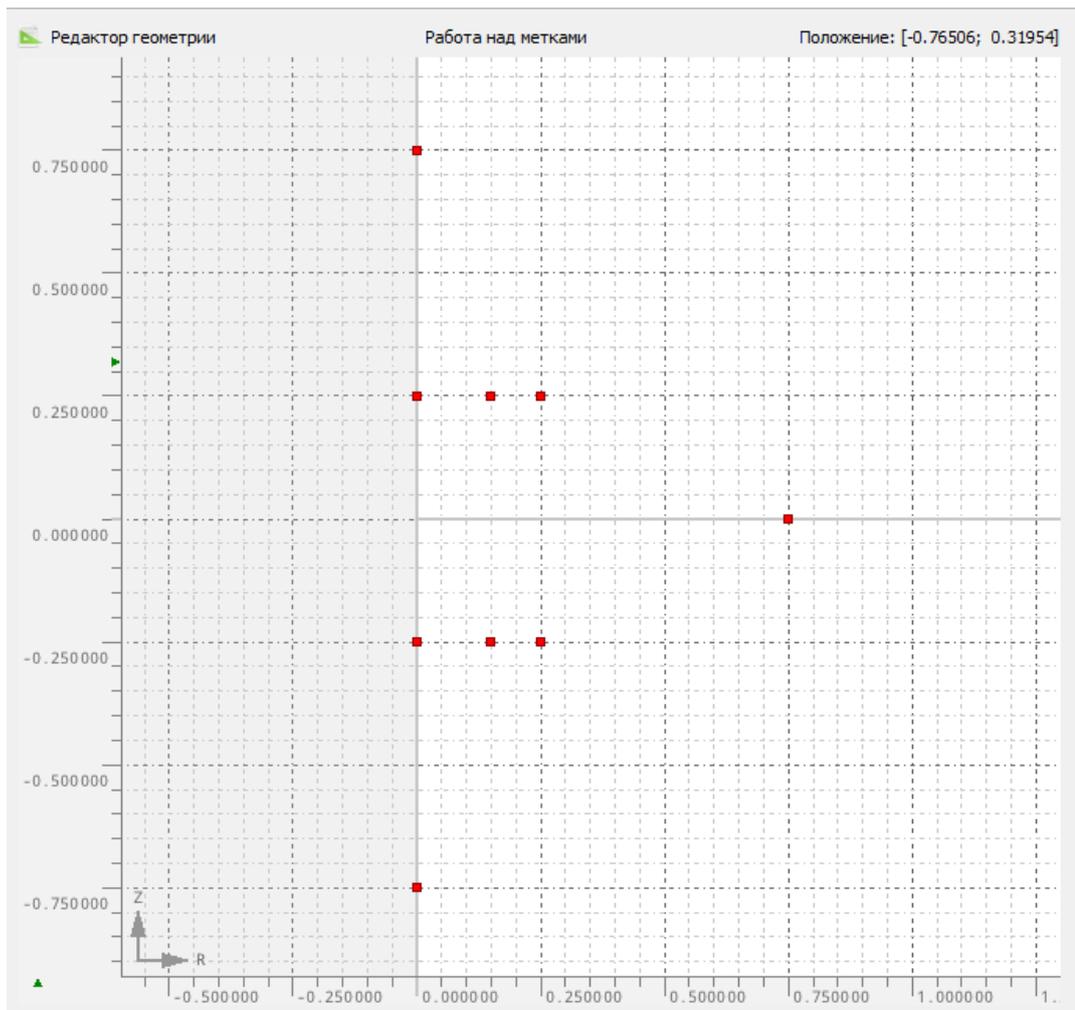


Рисунок 12.4 – Расположение точек

Для каждой точки необходимо задать координаты. Чтобы это сделать надо поочередно каждую из них и нажать на клавишу «пробел», как показано на рисунке 12.5.

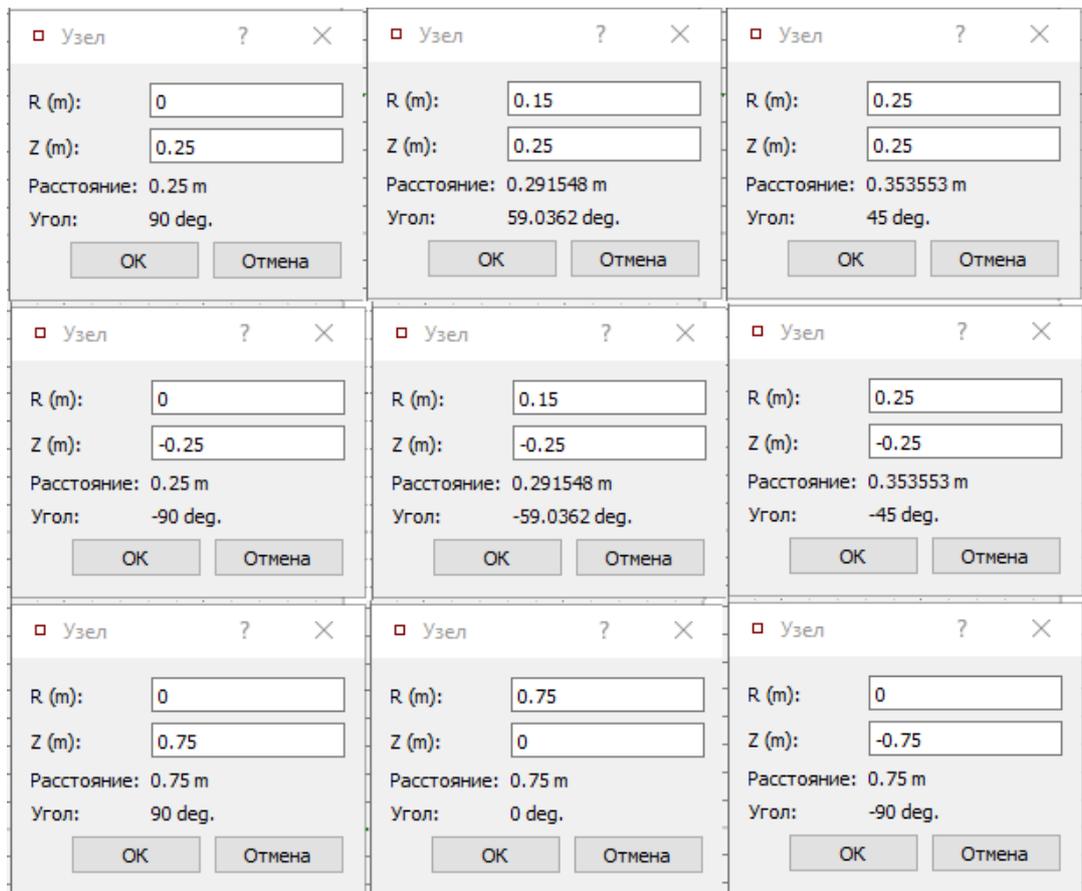


Рисунок 12.5 – Значения точек для соленоида с сердечником

Зададим значения узлов, как показано на рисунке 12.6.

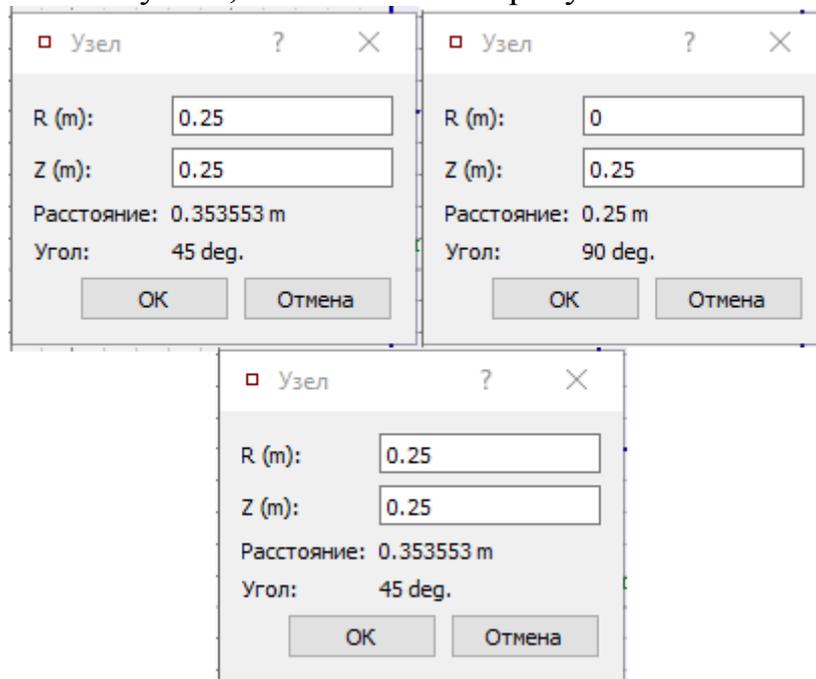


Рисунок 12.6 – Координаты узлов

Далее выберем инструмент «Ребро» на панели инструментов и, зажав клавишу «Ctrl», соединим точки, как на рисунке 12.7.

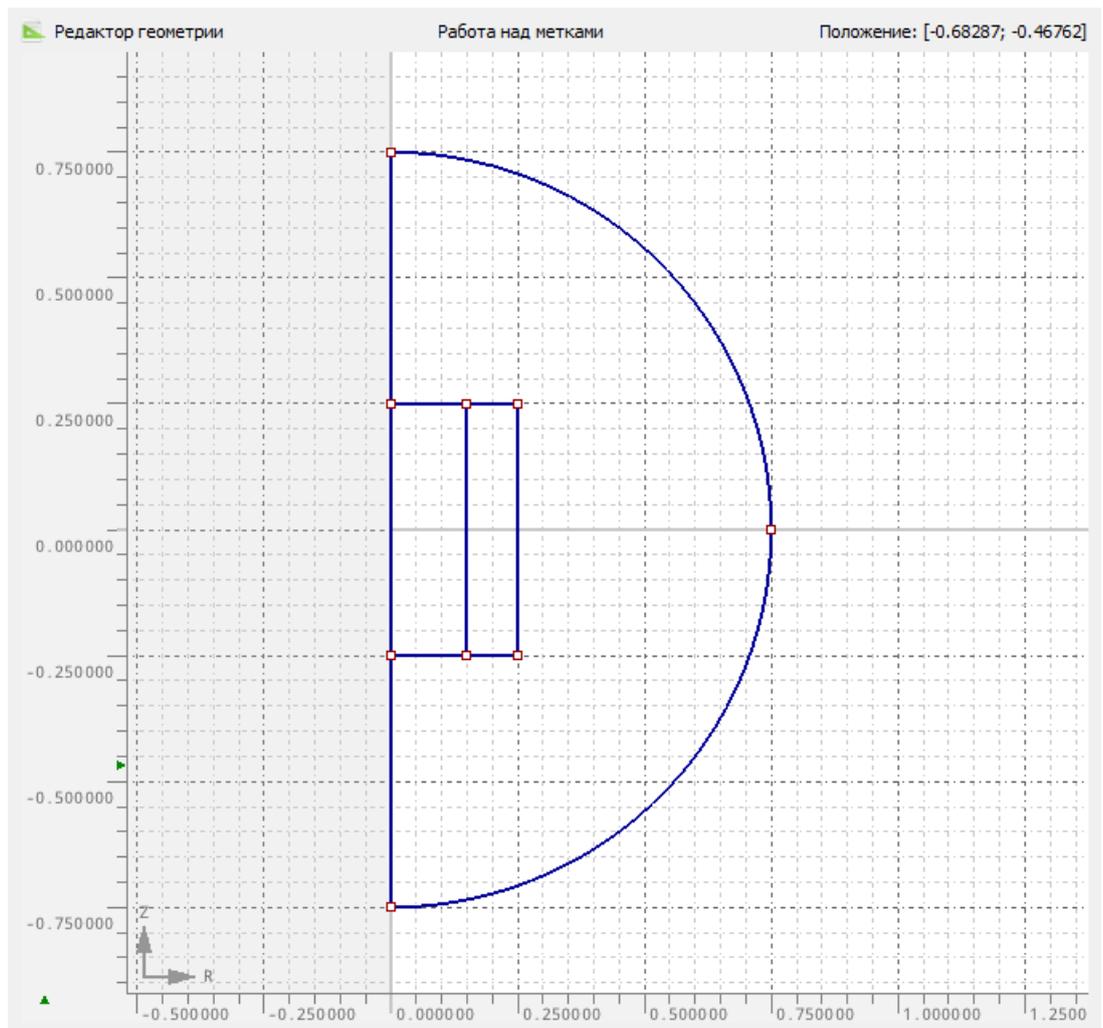


Рисунок 12.7 – Работа с ребрами

Для получения дуги окружности необходимо вначале нажать на одно из ребер, а далее на клавишу «Пробел». После этого появляется окно, в котором и задаются необходимые параметры для ребер (рис. 12.8).

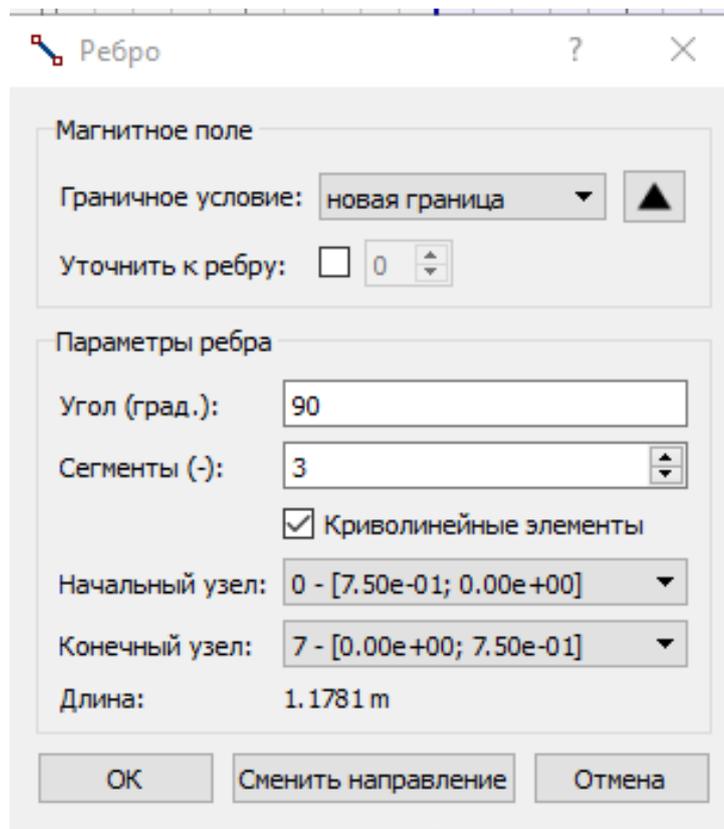


Рисунок 12.8 – Параметры ребра

Вышеописанная операция выполняется с двумя ребрами соленоида. В результате получаем готовую модель соленоида с сердечником и границы рабочей области, как видно из рисунка 12.9.

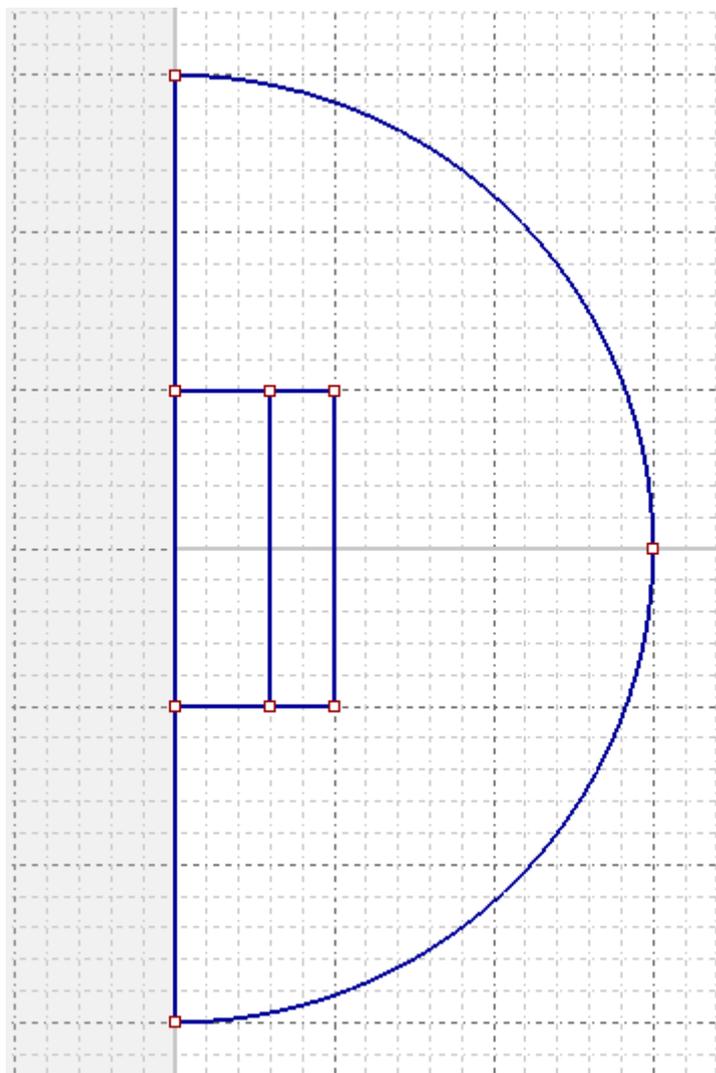


Рисунок 12.9 – Соленоид с сердечником

Для дальнейших расчетов необходимо расставить метки. Для этого воспользуемся соответствующей кнопкой. Одну метку создадим внутри круга, нажав одновременно на клавишу «Ctrl» и левую кнопку мыши. Другие две метки помещаем внутри границы рабочей области. Результат изображен на рисунке 12.10.

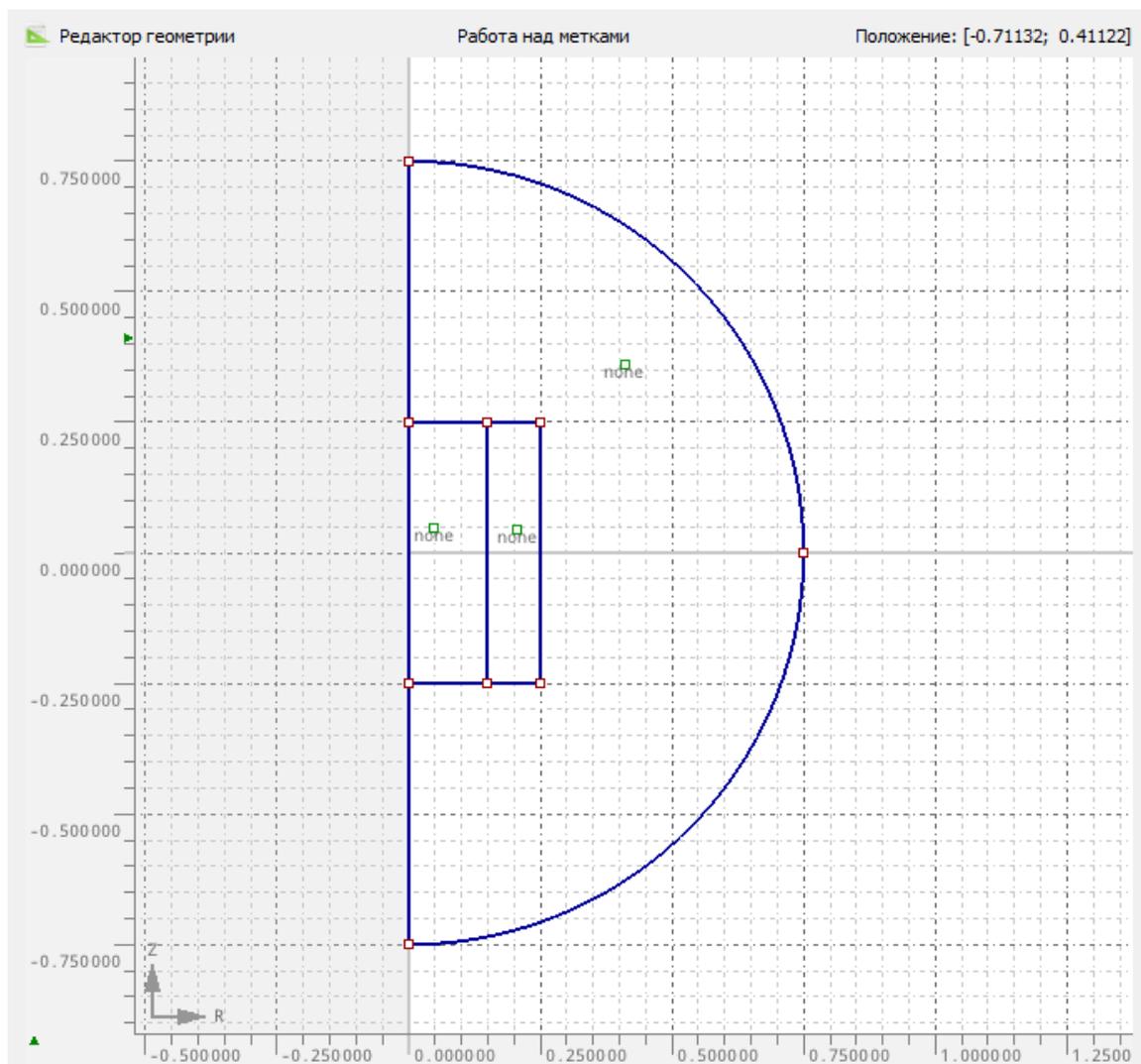


Рисунок 12.10 – Работа с метками

Теперь зададим граничные условия для рабочей области. Нажав правой кнопкой мыши, всплывает список с инструментами (рисунок 12.11). В нем необходимо выбрать пункт «New boundary condition...». После чего, появляется окно, в котором выбирается тип граничных условий, а также его параметры (рис. 12.11).

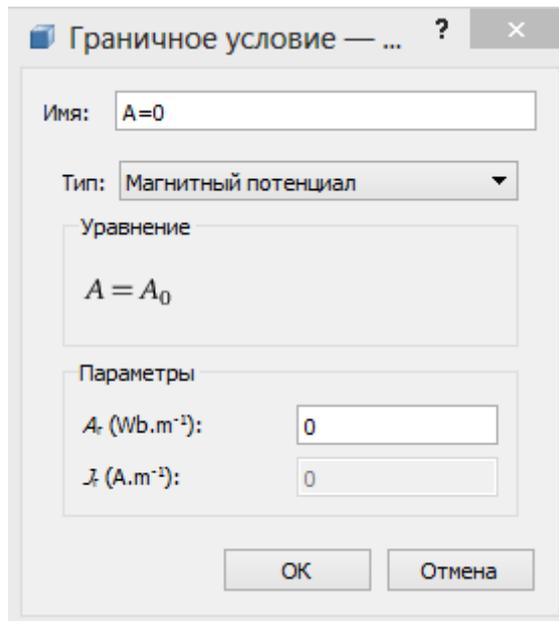


Рисунок 12.11 – Граничные условия

Для создания материалов для соленоида с сердечником щелкаем правой кнопкой мыши и из всплывающего списка, который показан на рисунке 12.12, выбираем пункт «New material...». Появляется диалоговое окно, в котором задаются параметры для материалов. В данном случае необходимо создать три материала: воздух, медь и железо (рисунок 12.12).

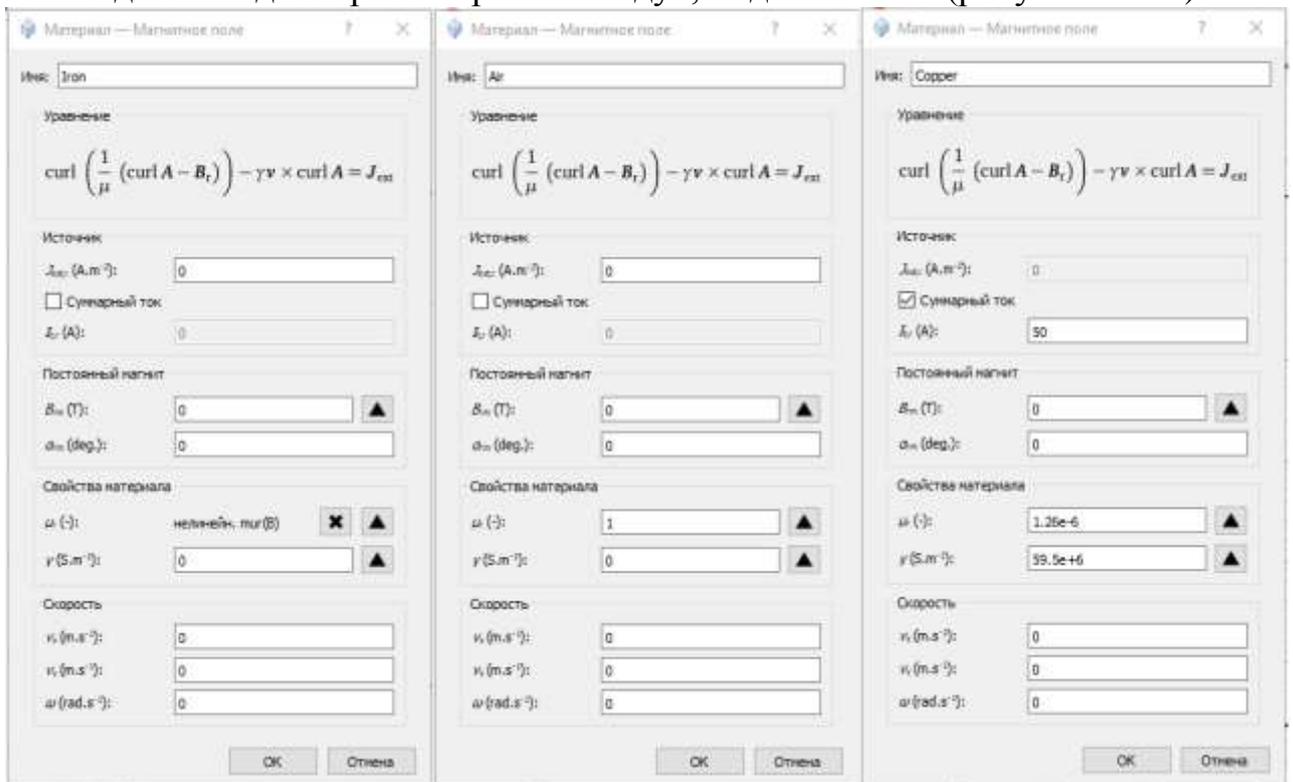


Рисунок 12.12 – Свойства материалов

Для того чтобы присвоить материал для соленоида, необходимо левой кнопкой мыши выделить метку внутри области сердечника с соленоидом и нажать клавишу «пробел». Появится диалоговое окно с выпадающим

списком, в котором нужно выбрать необходимый материал. Для рабочей области вокруг проводника проделываем то же самое, что и с областью проводника, здесь в качестве материала выбирается воздух (рис. 12.13). Для сердечника присваивается железо.

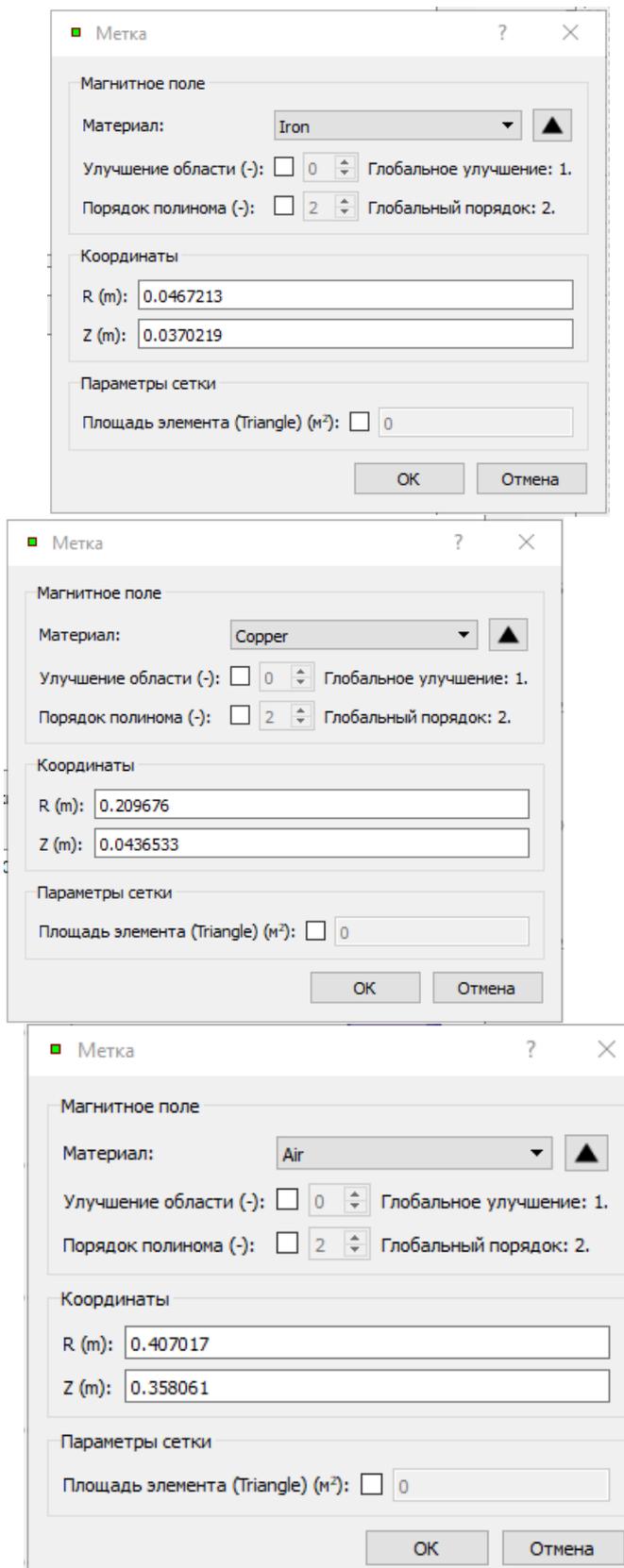


Рисунок 12.13 – Работа с материалами

На рисунке 12.14 представлена итоговая модель соленоида с сердечником с заданными характеристиками и параметрами.

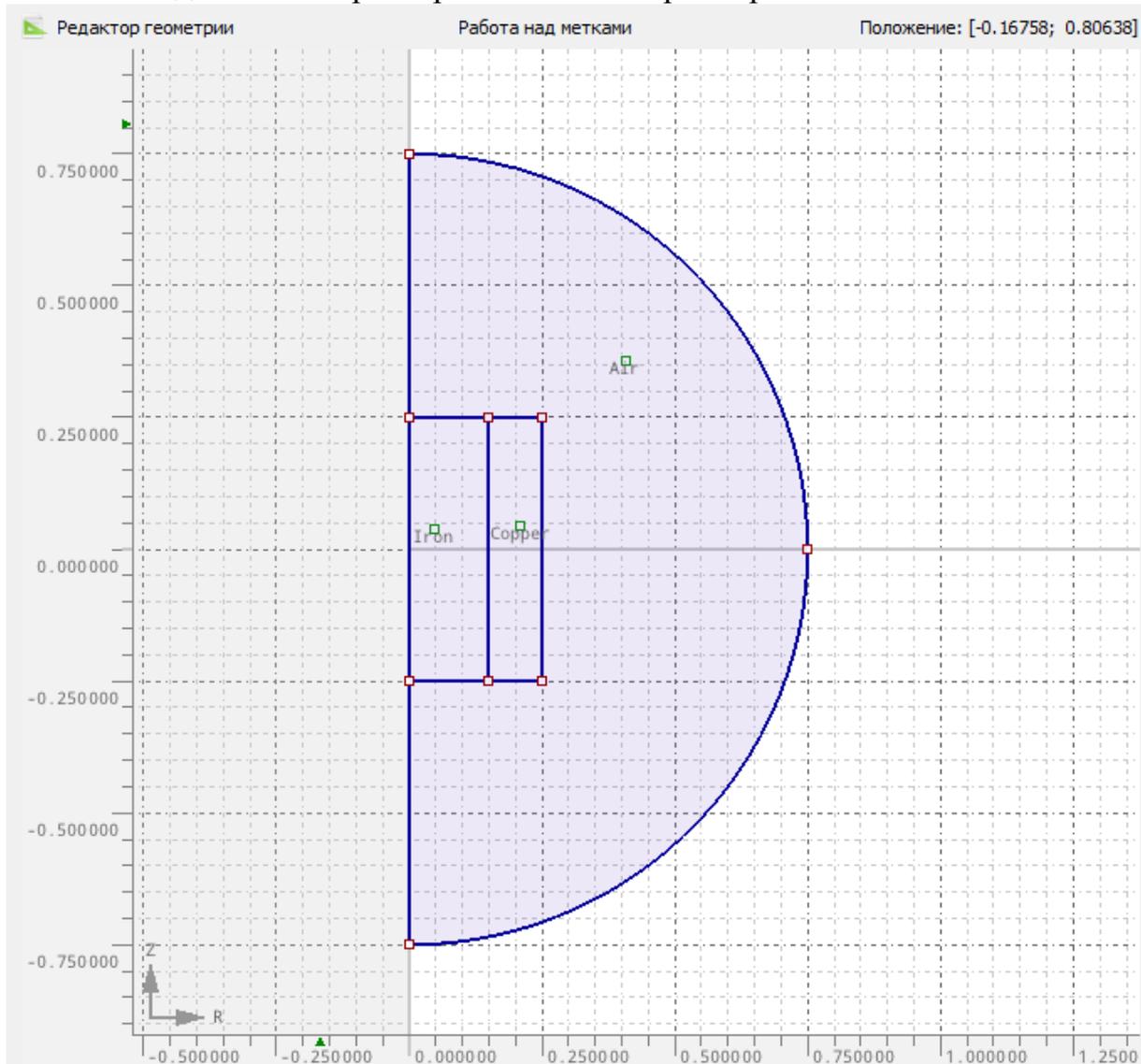


Рисунок 12.14 – Модель соленоида с сердечником в программной среде Agros2D

Теперь переходим во вкладку «Mesh area», где будет создана модель, как показано на рисунке 12.15.

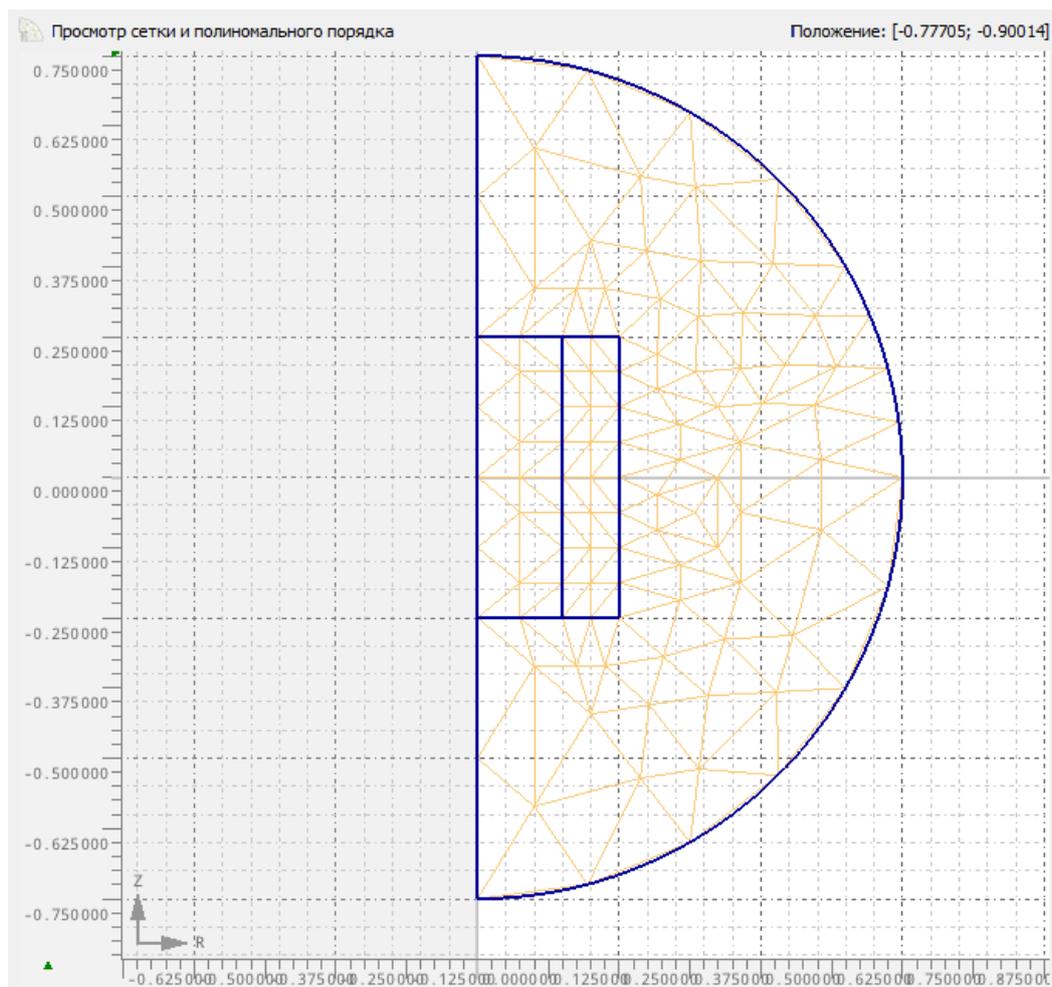


Рисунок 12.15 – Генерация сетки

Сгенерировав сетку переходим во вкладку «Solve» и получаем скалярное изображение магнитного поля вокруг соленоида с сердечником.

Во вкладке «Пост 2D» в поле выбираем нужную переменную (в данном случае выбирается Плотность потока) (рис. 12.16).

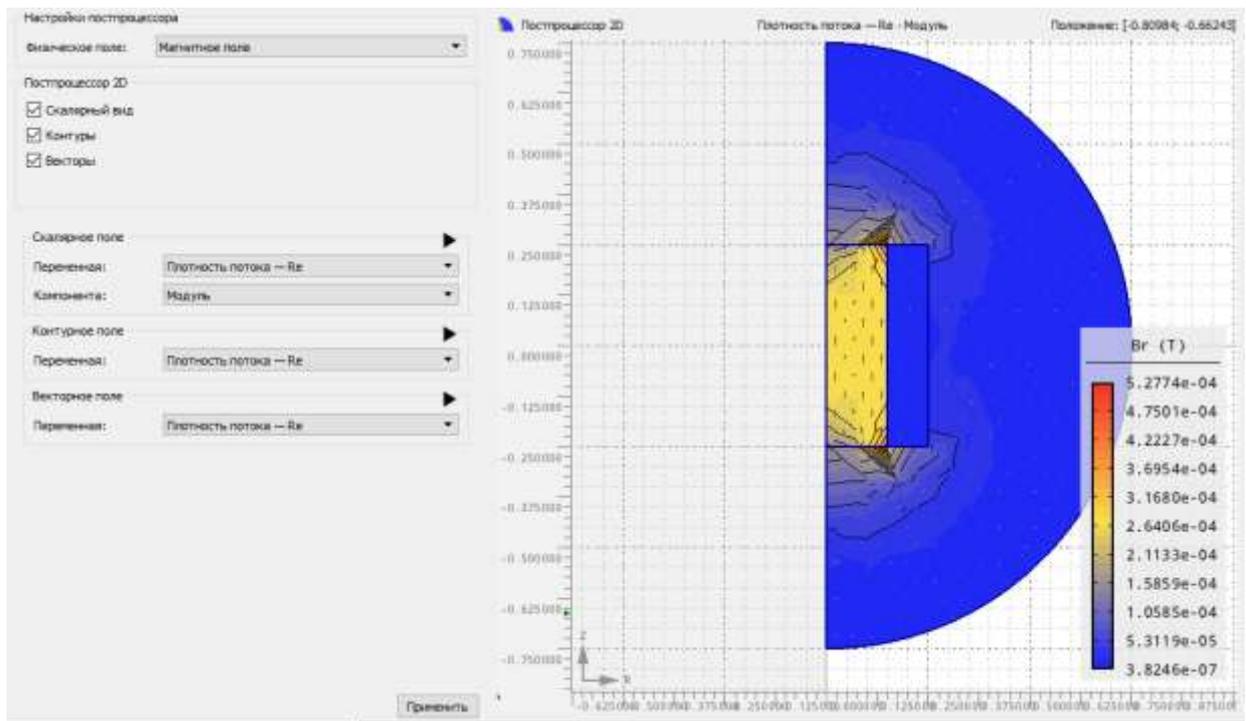


Рисунок 12.16 – Плотность потока

Результаты расчетов отображаются в правой части окна программы. Там можно увидеть итоги вычислений, как показано на рисунке 12.17.

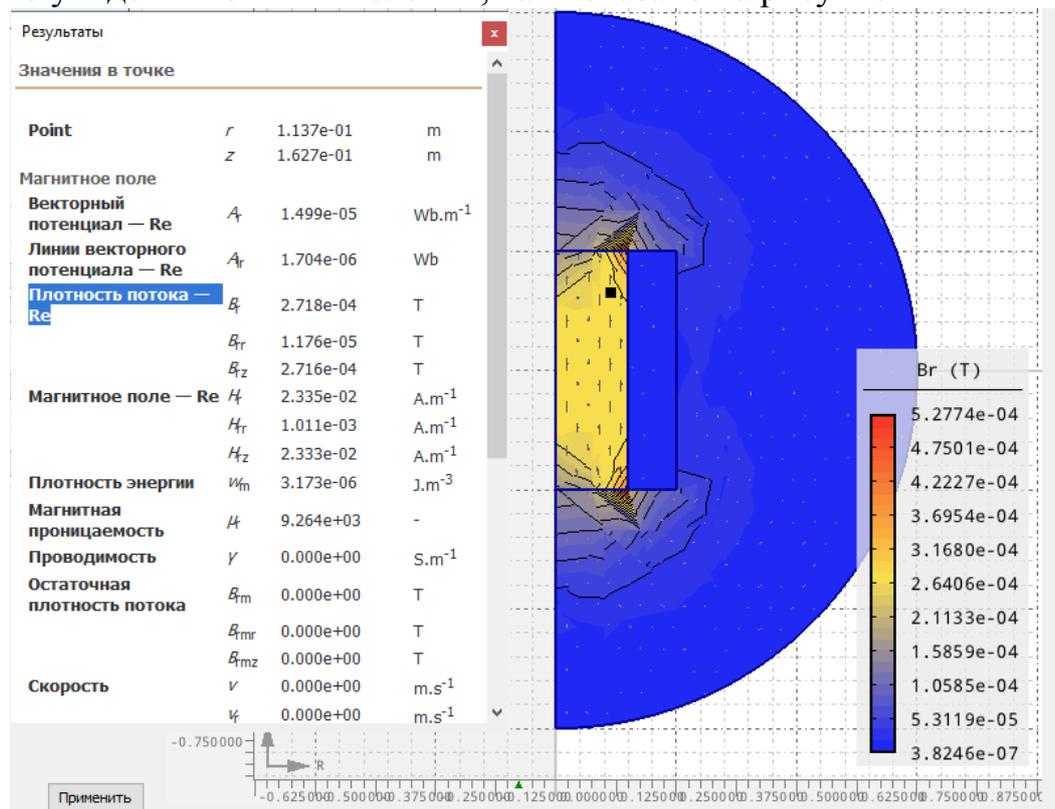


Рисунок 12.17 – Результаты вычислений

Исходя из полученных результатов видно, что программа показала значение магнитной индукции В поля, равную 0,3 мТл.

Для проверки полученного значения были произведены вычисления аналитическим способом:

$$B = \mu_0 \mu I \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}} = 4\pi * 10^{(-7)} * 6,3 * 10^{-2} * 50 * \frac{0,1}{\sqrt{4 * 0,04^2 + 0,1^2}}$$

$$= 3 * 10^{-6} \text{ Тл.}$$

Результаты отличаются в 100 раз.

Результат измерения, полученный в Agros2D некорректен. Проанализировав процесс построения модели, можно выделить существенный недочет – отсутствие возможности задать число витков медной проволоки. Автоматически программа задает число витков равное 1, это и приводит к не сходимости результатов.

Для решения этой проблемы необходимо, во время осуществления аналитического расчета, умножить заданную силу тока на количество витков медной проволоки (в случае с нашей задачей, число витков равно 100):

$$B = \mu_0 \mu n I \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}}$$

$$= 4\pi * 10^{(-7)} * 6,3 * 10^{-2} * 100 * 50 * \frac{0,1}{\sqrt{4 * 0,04^2 + 0,1^2}}$$

$$= 3 * 10^{-4} \text{ Тл} = 0,3 \text{ мТл.}$$

Проделанное действие дает возможность получить правильный результат, такой же, как и в программной среде FEMM.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в FEMM.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами в соответствии с вашим вариантом (материал сердечника - железо).

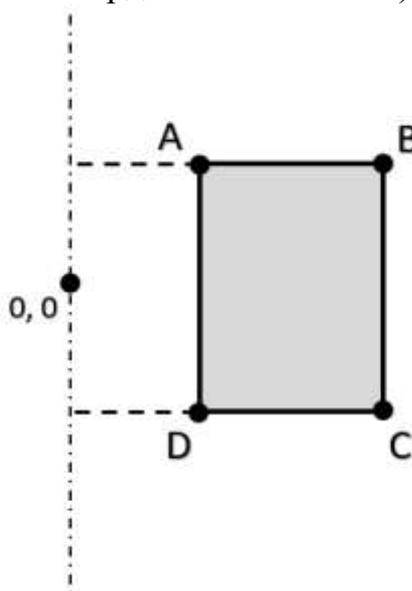


Рисунок 2.9 – Чертеж сечения обмотки соленоида с указанием точек для построения

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения заданий

| Номер<br>варианта | A  |     | B   |     | C   |      | D  |      | I | N   |
|-------------------|----|-----|-----|-----|-----|------|----|------|---|-----|
|                   | rA | zA  | rB  | zB  | rC  | zC   | rD | zD   |   |     |
| 1                 | 2  | 2   | 4   | 2   | 4   | -2   | 2  | -2   | 2 | 200 |
| 2                 | 1  | 3   | 2   | 3   | 2   | -3   | 1  | -3   | 2 | 200 |
| 3                 | 4  | 1   | 6   | 1   | 6   | -1   | 4  | -1   | 2 | 200 |
| 4                 | 2  | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | -2.5 | 2  | -2.5 | 2 | 200 |
| 5                 | 1  | 0.5 | 5   | 0.5 | 5   | -0.5 | 1  | -0.5 | 2 | 200 |
| 6                 | 2  | 2   | 4   | 2   | 4   | -2   | 2  | -2   | 4 | 150 |
| 7                 | 1  | 3   | 2   | 3   | 2   | -3   | 1  | -3   | 4 | 150 |
| 8                 | 4  | 1   | 6   | 1   | 6   | -1   | 4  | -1   | 4 | 150 |
| 9                 | 2  | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | -2.5 | 2  | -2.5 | 4 | 150 |
| 10                | 1  | 0.5 | 5   | 0.5 | 5   | -0.5 | 1  | -0.5 | 4 | 150 |
| 11                | 2  | 2   | 4   | 2   | 4   | -2   | 2  | -2   | 5 | 100 |
| 12                | 1  | 3   | 2   | 3   | 2   | -3   | 1  | -3   | 5 | 100 |
| 13                | 4  | 1   | 6   | 1   | 6   | -1   | 4  | -1   | 5 | 100 |
| 14                | 2  | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | -2.5 | 2  | -2.5 | 5 | 100 |
| 15                | 1  | 0.5 | 5   | 0.5 | 5   | -0.5 | 1  | -0.5 | 5 | 100 |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

### Определение магнитной индукции поля проводника с током в Agros2D

**Задача.** Система состоит из двух проводящих дисков, расположенных один над другим в воздухе на расстоянии 1,5 мм. Диаметр дисков составляет 12 мм, толщина 0,4 мм. На верхний диск подан потенциал 1500 В. Рассчитать заряд верхнего диска.

Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводом, находящуюся в точке  $A$  на расстоянии от провода на  $b = 5$  см. Сила тока  $I$ , текущая по проводу, равна 50 А.

Решение:

1) Аналитический способ.

Для определения магнитной индукции поля, создаваемого проводом, воспользуемся законом Био - Савра - Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [\vec{dl}, \vec{r}]}{4\pi r^3}.$$

(27)

Принцип суперпозиции:

$$\vec{B} = \int_l^0 d\vec{B}.$$

(28)

Магнитное поле прямолинейного проводника с током:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\varphi}{r^2};$$

(29)

$$B = \int_l^0 dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l^0 \frac{Idl \sin\varphi}{r^2}.$$

(30)

Так как

$$b = \frac{r}{\sin\varphi}, \text{ а } dl = \frac{rd\varphi}{\sin\varphi},$$

(31)

то

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \sin\varphi d\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2).$$

(32)

Для бесконечно длинного проводника ( $\varphi_1 \rightarrow 0, \varphi_2 \rightarrow \pi$ ):

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}.$$

(33)

Подставим числовые значения в формулу и произведем вычисления:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{2\pi \cdot 0,05} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} = 0,2 \text{ мТл}.$$

Ответ:  $B = 0,2$  мТл.

## 2.2 Численное решение на основе метода конечных элементов посредством программы Agros2D.

2) Численное решение на основе метода конечных элементов посредством программы Agros2D.

Запустите Agros2D, выбрав соответствующий пункт, размещенный в разделе меню «Пуск». После запуска программы выберите  в главном меню, чтобы создать новый документ. Появится диалоговое окно, позволяющее выбрать тип создаваемой проблемы. Для решения данной задачи необходимо выбрать «Magnetic field»  из списка предлагаемых проблем (рис. 13.1).

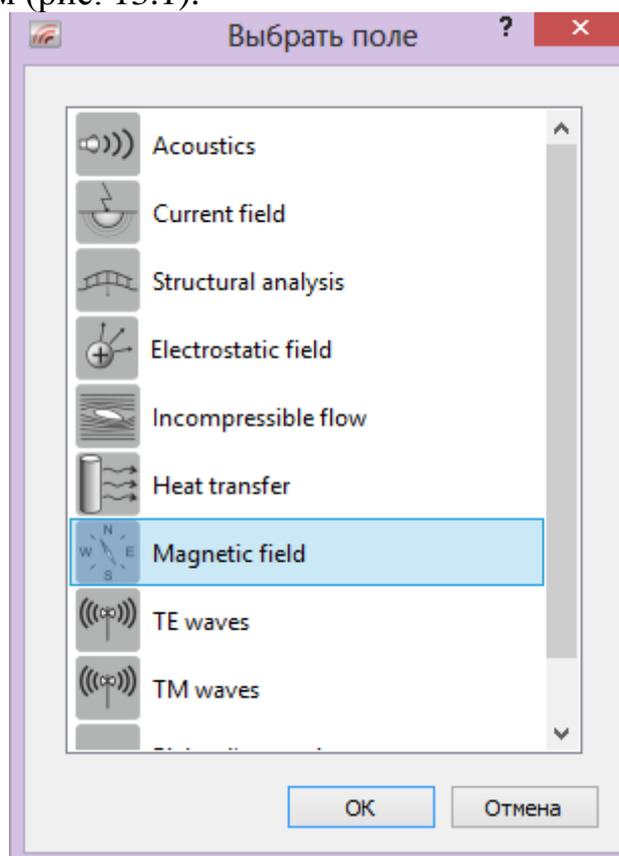


Рисунок 13.1 – Выбор типа задачи

После выбора типа задачи осуществляется переход во вкладку  «Свойства», где нужно задать основные параметры исследуемой проблемы.

Для начала выбрать тип координат и тип сетки, как показано на рисунке 13.2.

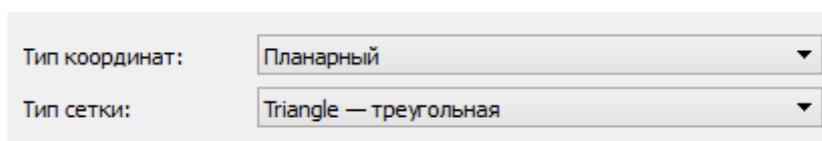


Рисунок 13.2 – Основные параметры задачи



Далее нажать на кнопку , после чего появится диалоговое окно (рисунок 13.3), где задаются остальные параметры для решения проблемы.

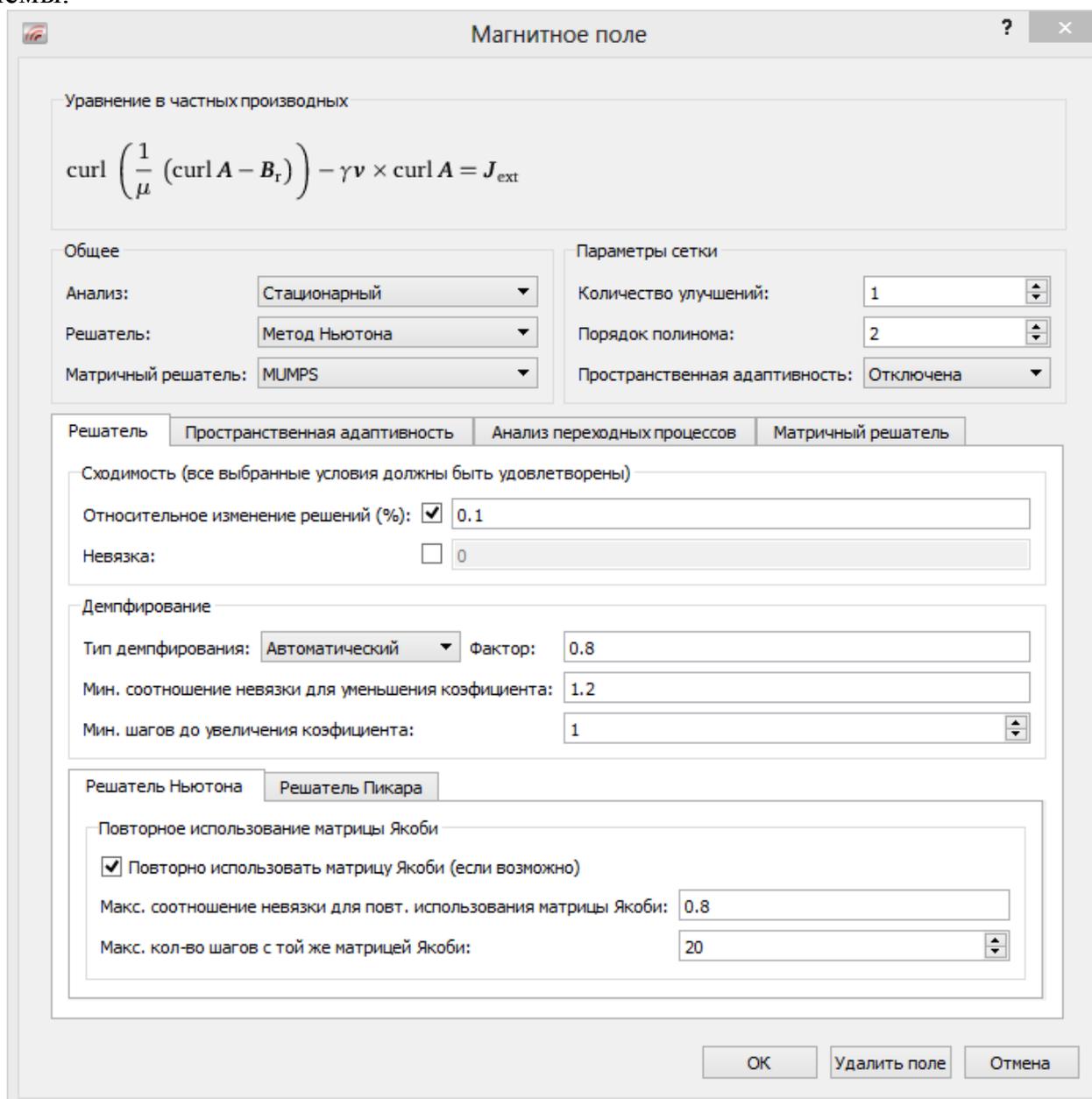


Рисунок 13.3 – Основные параметры задачи



После задания параметров переходим во вкладку , в рабочем поле которого создадим проводник с током. Для этого поставим четыре точки, выбрав инструмент «узел»  и зажав клавишу «Ctrl» поставить точки в рабочем поле. Затем каждую точку нужно выделить и нажать на клавишу «пробел» и задать точкам координаты, как показано на рисунке 13.4.

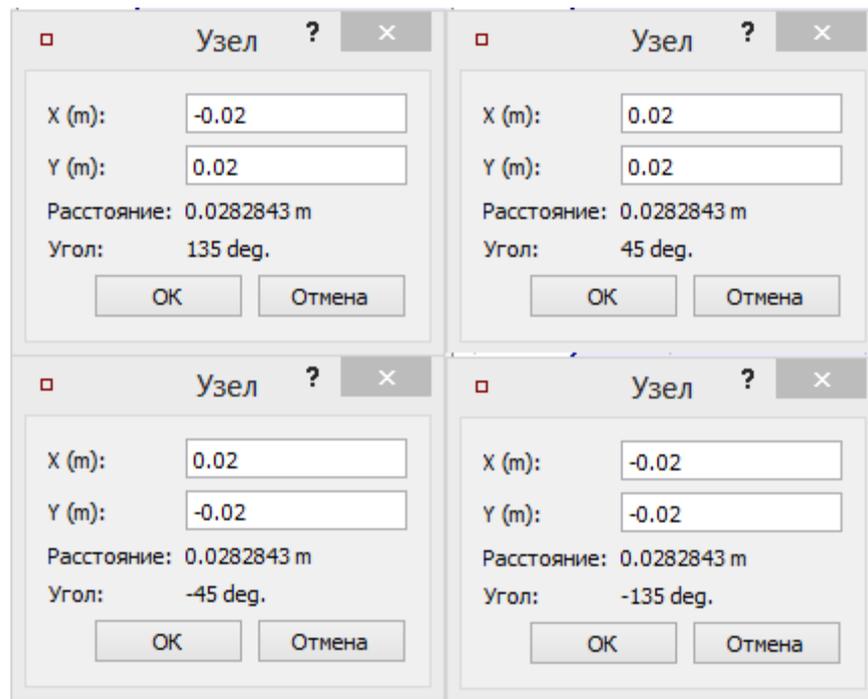


Рисунок 13.4 – Значения точек для проводника с током

Тоже самое, теперь, необходимо сделать при создании границы рабочей области. Зададим значения узлов, как на рисунке 13.5.

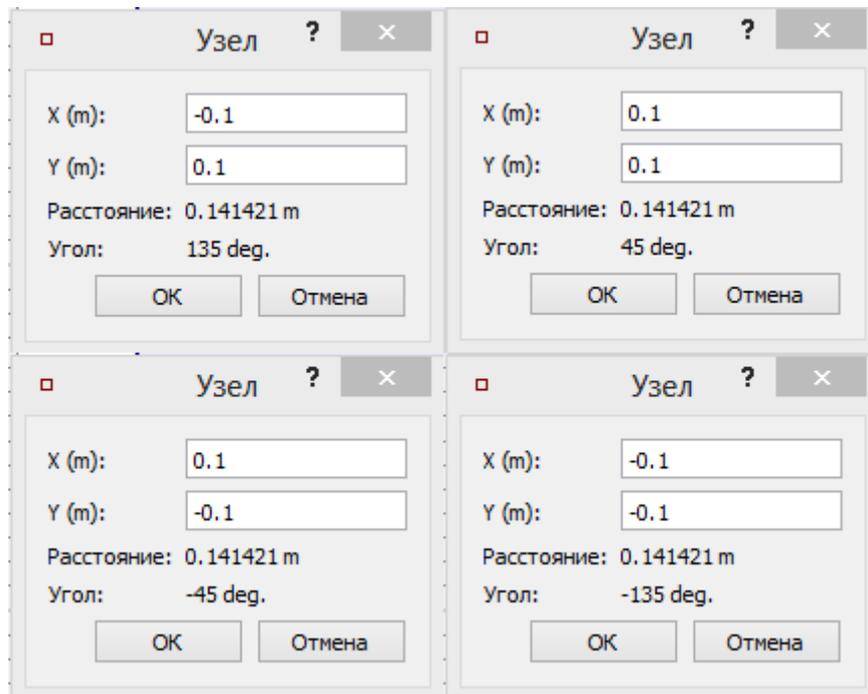


Рисунок 13.5 – Значения точек для рабочей зоны

Далее выберем инструмент «ребро»  и, зажав клавишу «Ctrl», соединить первые 4 точки, чтобы получился квадрат. Таким же образом соединяем следующие четыре точки. В итоге получается следующая картина (рисунок 13.6).

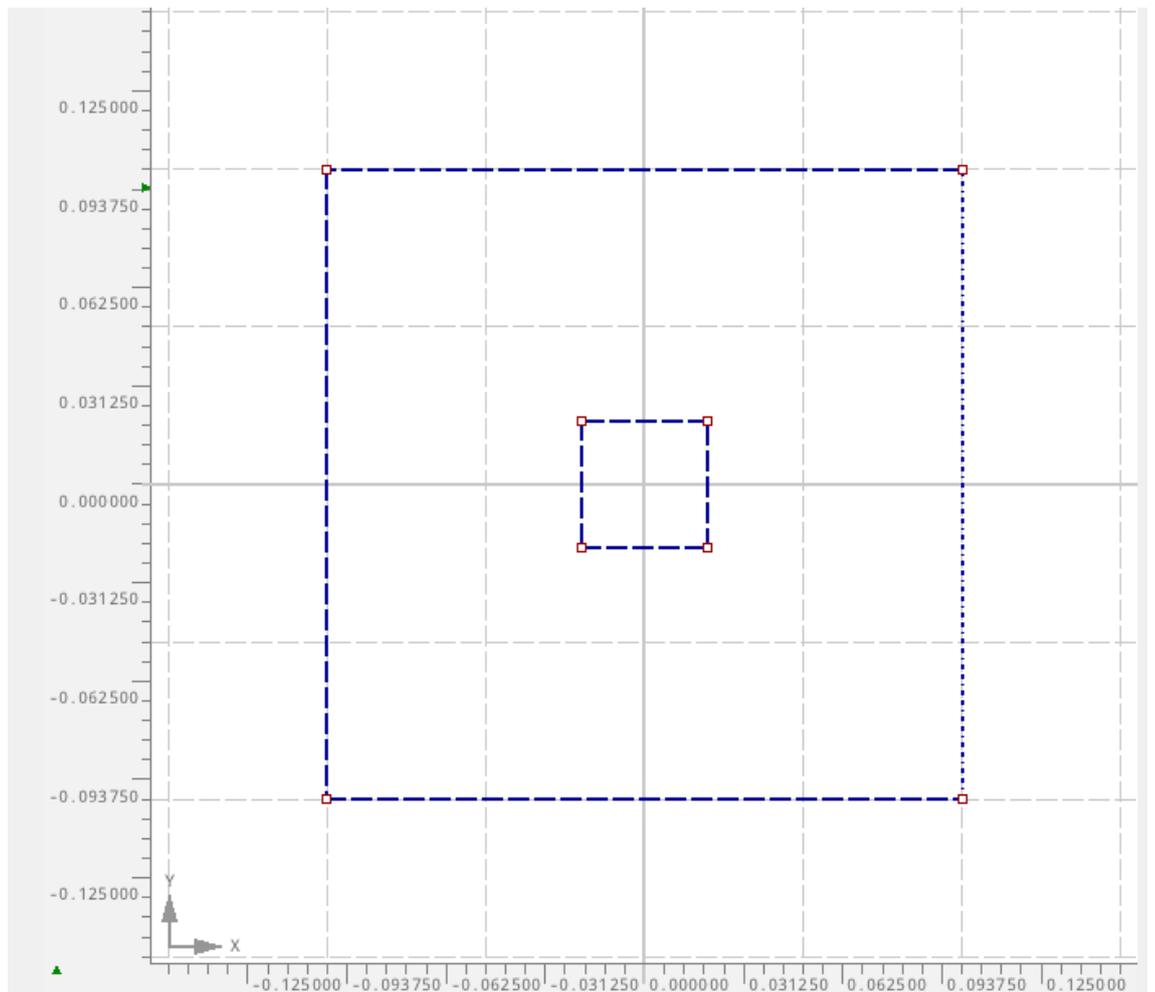


Рисунок 13.6 – Работа с ребрами

Чтобы срез проводника и граница рабочей зоны приобрели форму круга, нужно поступить следующим образом. Необходимо нажать на одно из ребер, а далее нажать клавишу «пробел». При этом всплывает диалоговое окно, в котором задаются необходимые параметры для ребер, как показано на рисунке 13.7.

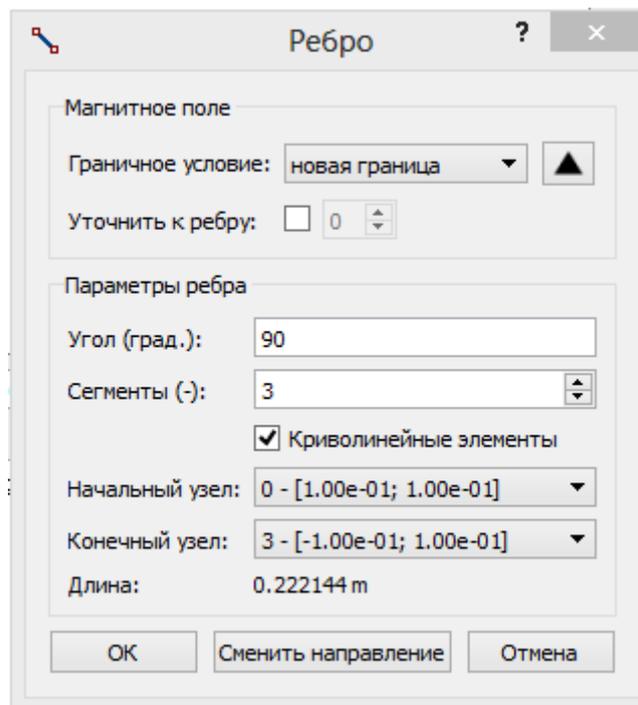


Рисунок 13.7 – Работа с ребрами

Также проделываем те же операции с другими ребрами.

В результате получим срез проводника с током и границы рабочей области, как видно из рисунка 13.8.

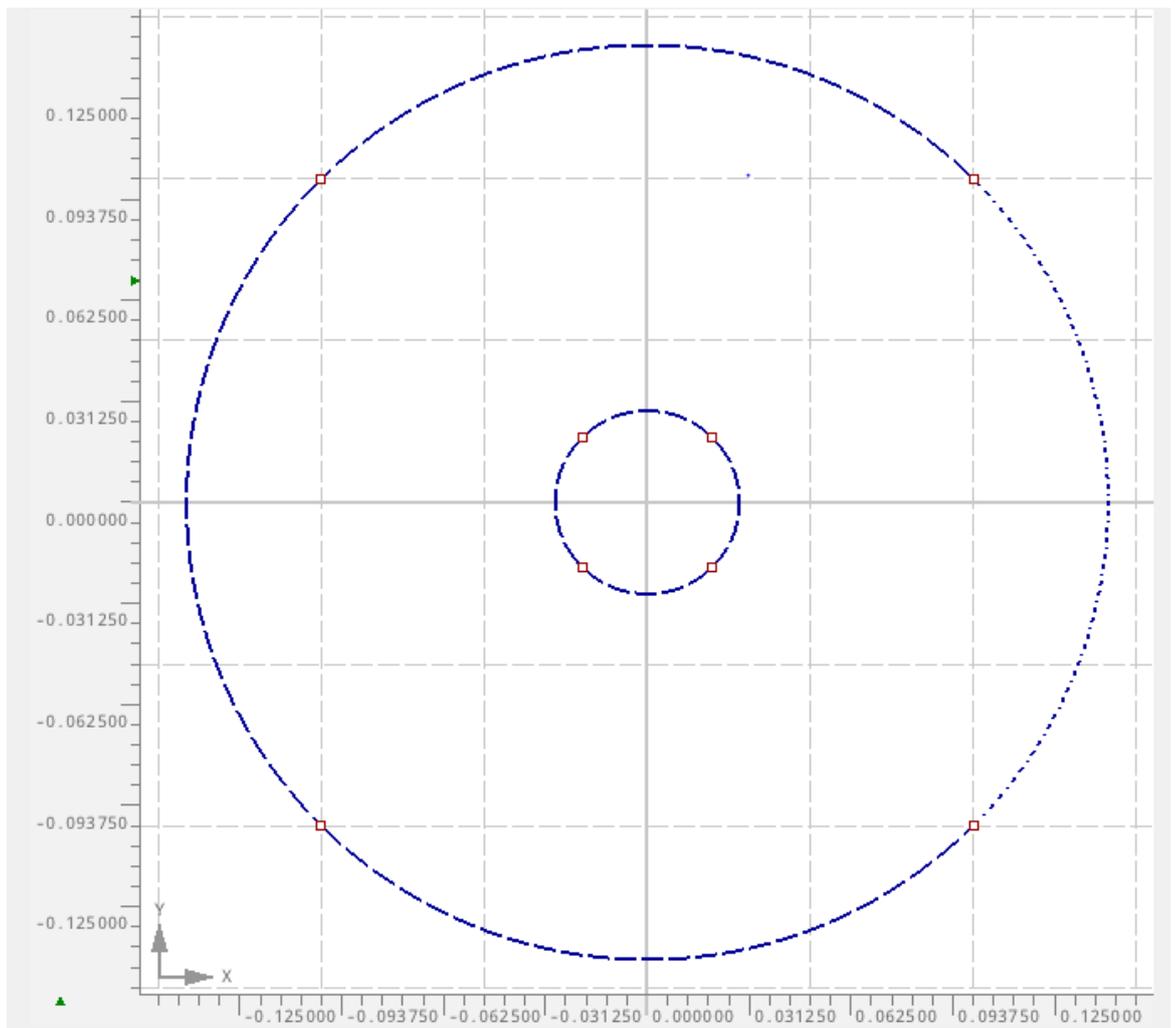


Рисунок 13.8 – Проводник с током и рабочая область вокруг него

Далее воспользуемся инструментом «метка» . Одну метку создадим внутри малого круга (срезом проводника), нажав одновременно на клавишу «Ctrl» и левую кнопку мыши. Другую метку помещаем внутри границы рабочей области. Результат показан на рисунке 13.9.

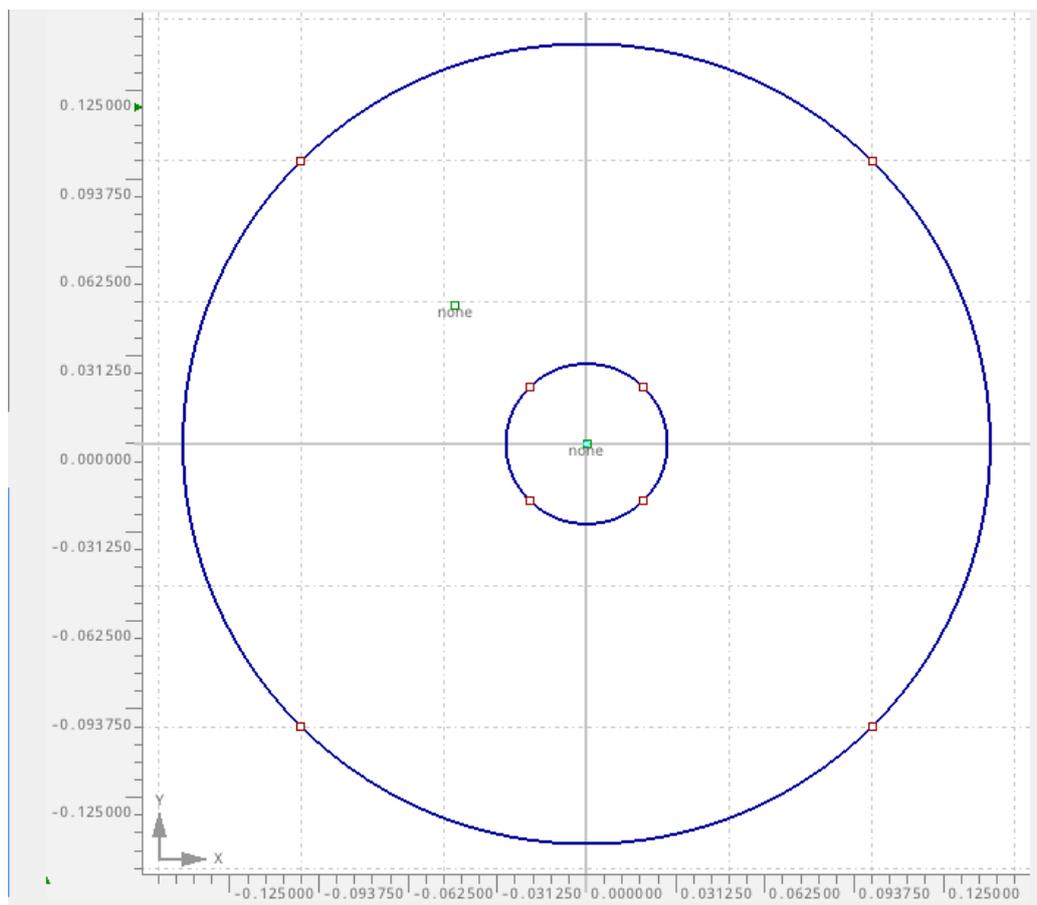


Рисунок 13.9 – Работа с метками

Следующим действием нужно задать граничные условия для рабочей области. Щелкнув правой кнопкой мыши, в рабочем поле всплывает список с инструментами (рисунок 13.10).

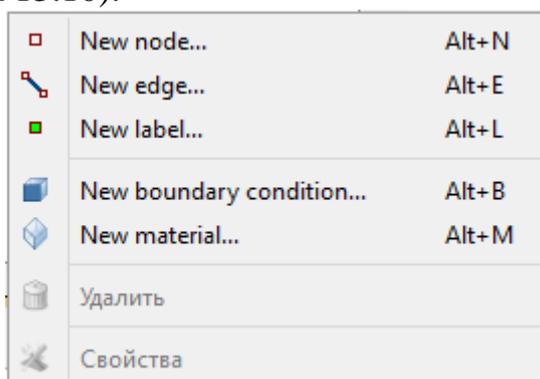


Рисунок 13.10 – Создание граничных условий

Необходимо выбрать пункт «New boundary condition...». Выбрав его, появляется диалоговое окно, в котором выбирается тип граничных условий, а также его параметры. Для решения данной задачи параметры граничных условий показаны на рисунке 13.11.

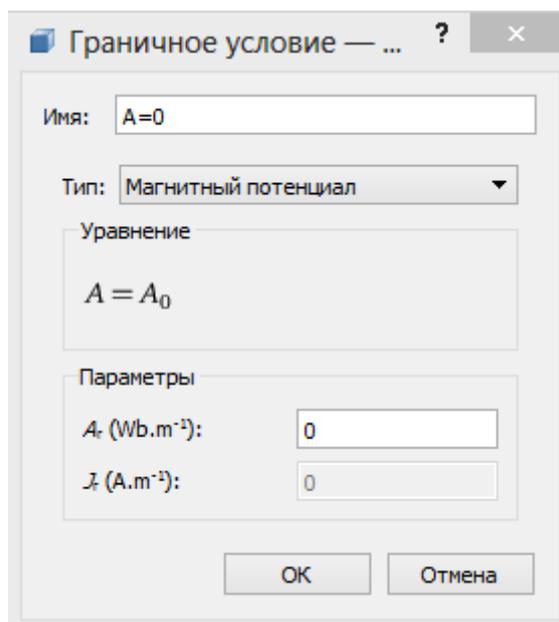


Рисунок 13.11 – Параметры граничных условий

Далее, для присвоения граничных условий рабочей области необходимо выделить все четыре ребра внешнего круга и нажать клавишу «пробел», после сего на экране появится диалоговое окно с выпадающим списком, в котором нужно выбрать созданные ранее граничные условия (рисунок 13.12).

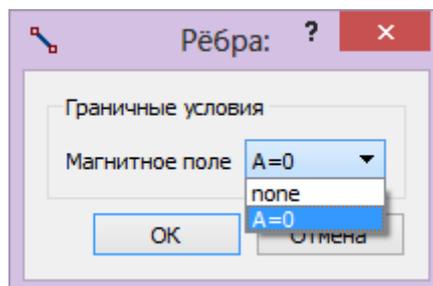


Рисунок 13.12 – Присвоение граничных условий

Для создания материалов для проводника с током щелкаем правой кнопкой мыши и из всплывающего списка, который показан на рисунке 15, выбираем пункт «New material...». Появляется диалоговое окно, в котором задаются параметры для материалов. В данном случае необходимо создать два материала: воздух и медь, как показано на рисунке 13.13.

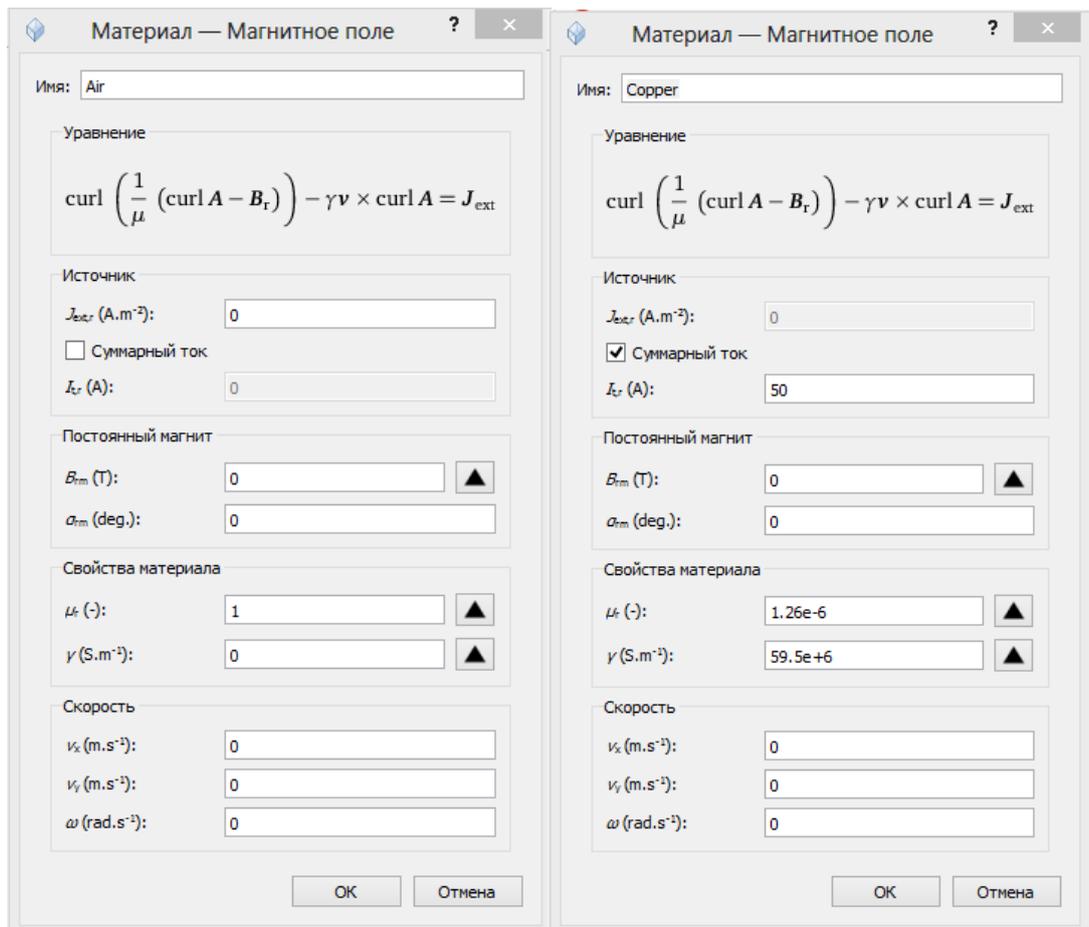


Рисунок 13.13 – Свойства материалов

Для того, чтобы присвоить материал для провода, необходимо левой кнопкой мыши выделить метку внутри области среза проводника с током и нажать клавишу «пробел». Появится диалоговое окно с выпадающим списком, в котором нужно выбрать необходимый материал – медь. Для рабочей области вокруг проводника проделываем то же самое, что и с областью проводника, но здесь материалом выбирается воздух (рисунок 13.14).

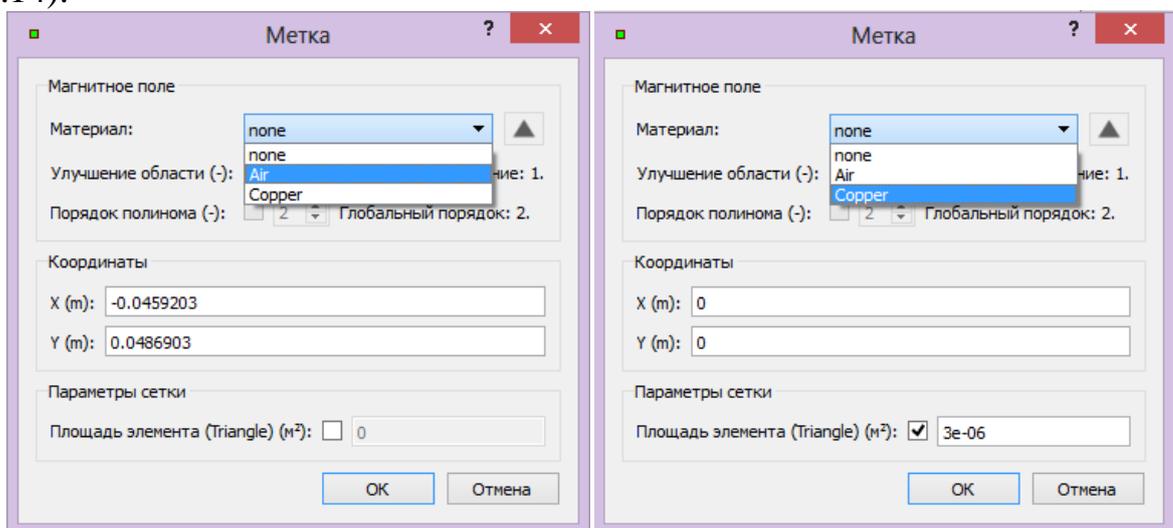


Рисунок 13.14 – Работа с материалами

На рисунке 13.15 показана готовая геометрия модели проводника с током со всеми необходимыми характеристиками и параметрами.

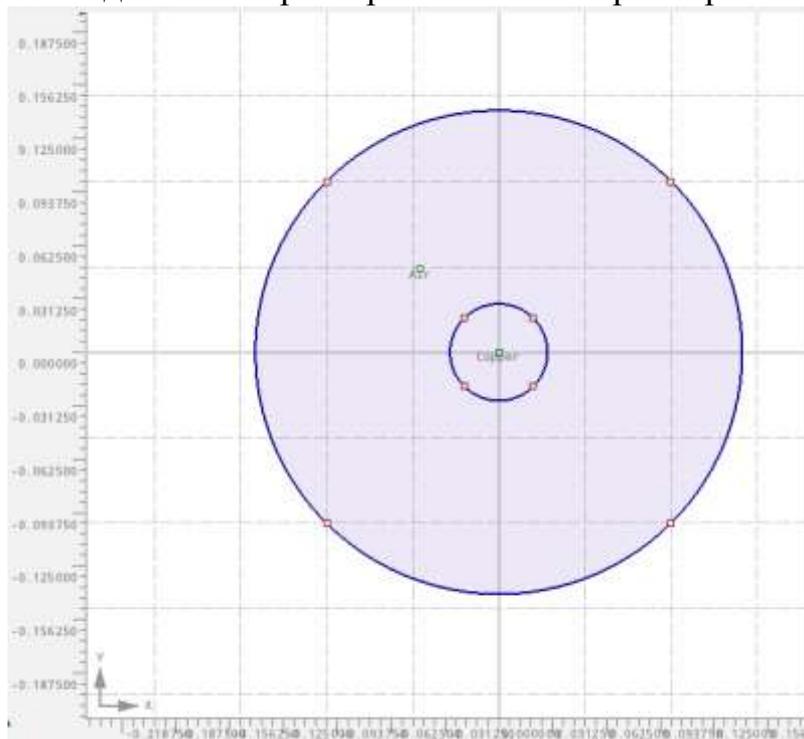
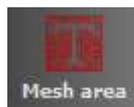


Рисунок 13.15 – Модель проводника с током в программной среде Agros2D



Теперь переходим во вкладку **Mesh area**, где создается модель, как показано на рисунке 13.16.

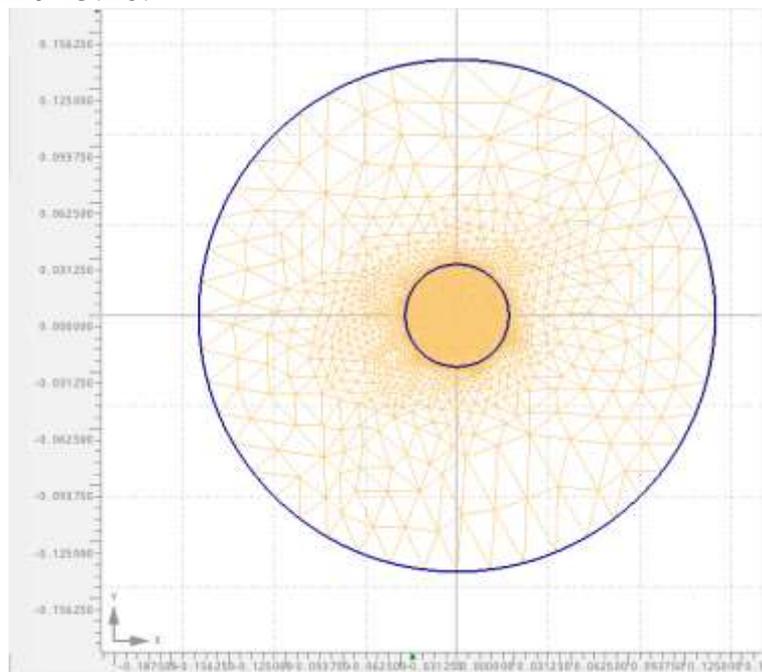


Рисунок 13.16 – Генерация сетки



После генерации сетки переходим во вкладку  и получаем скалярное изображение магнитного поля вокруг медного провода с током (рис. 13.17).

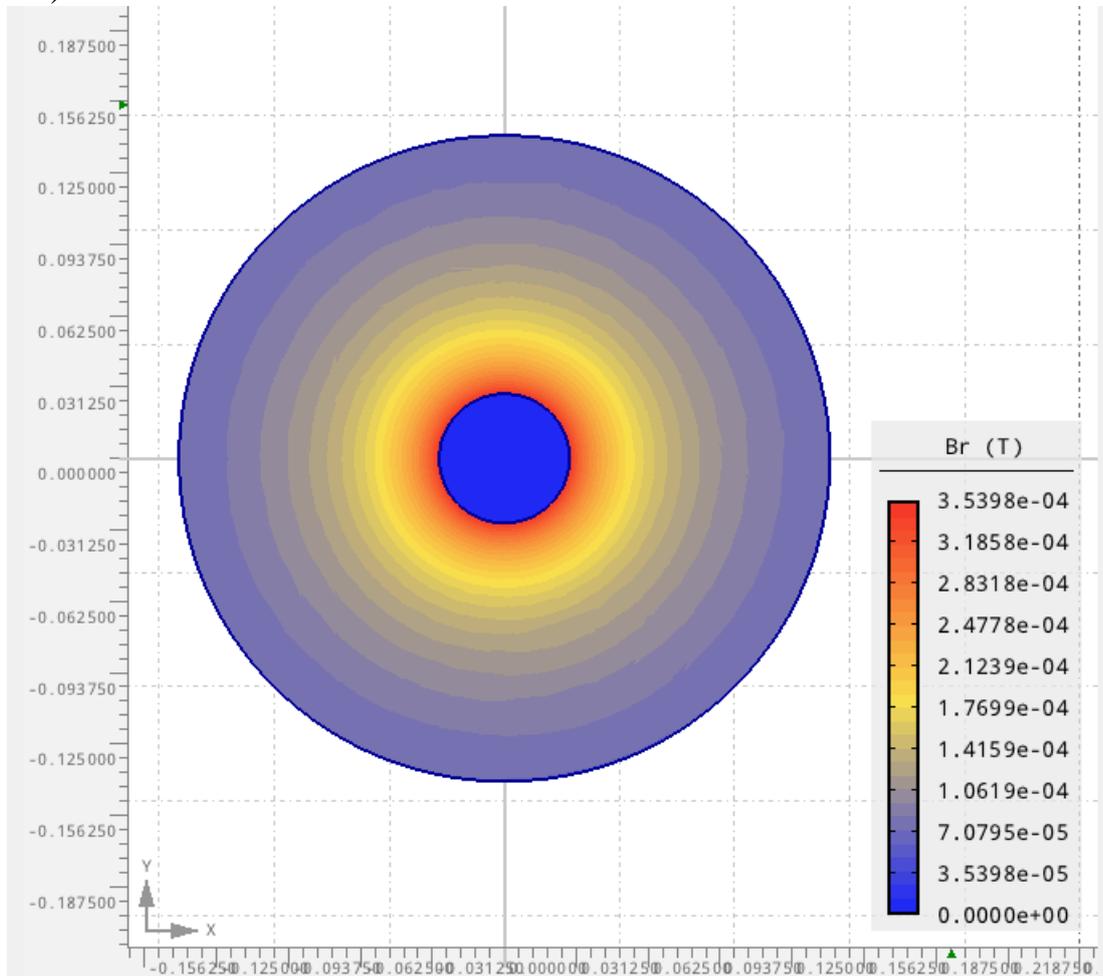
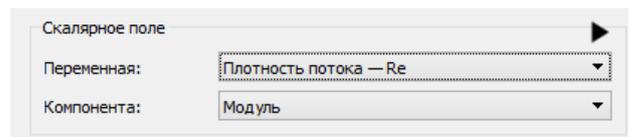


Рисунок 13.17 – Скалярный вид магнитного поля медного провода



Во вкладке  в поле выбираем нужную переменную (в данном случае выбирается Плотность потока). Далее выбираем инструмент «Локальные значения»  и ставим точку на расстоянии, указанном в условии задачи – 0,05 м, как показано на рисунке 13.18.

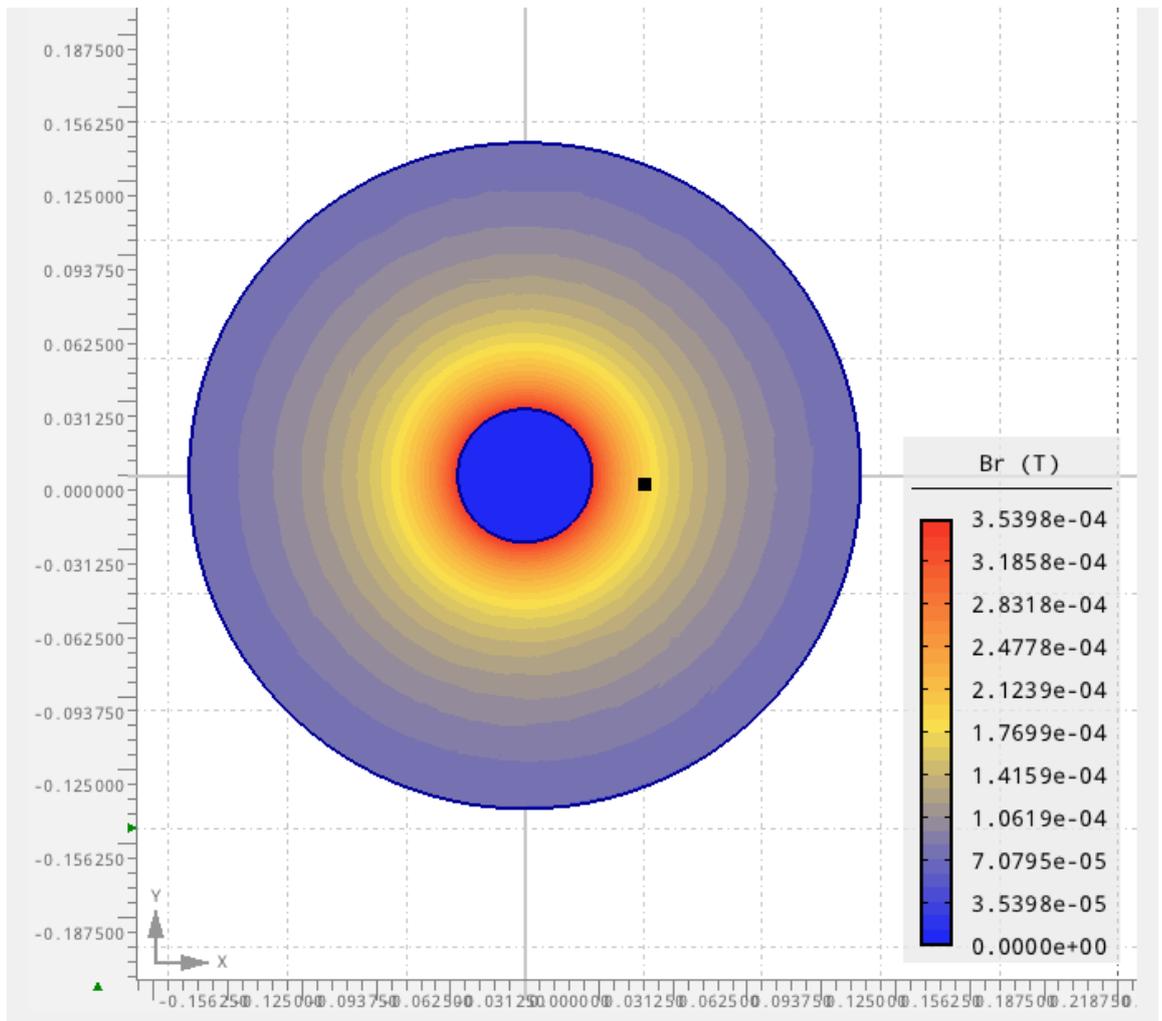


Рисунок 13.18 – Локальное значение

Чтобы видеть результаты расчетов необходимо нажать кнопку «Вид» и выбрать пункт «Панели», из списка которого нажать на панель «Результаты», где будут показаны итоги вычислений, как показано на рисунке 13.19.

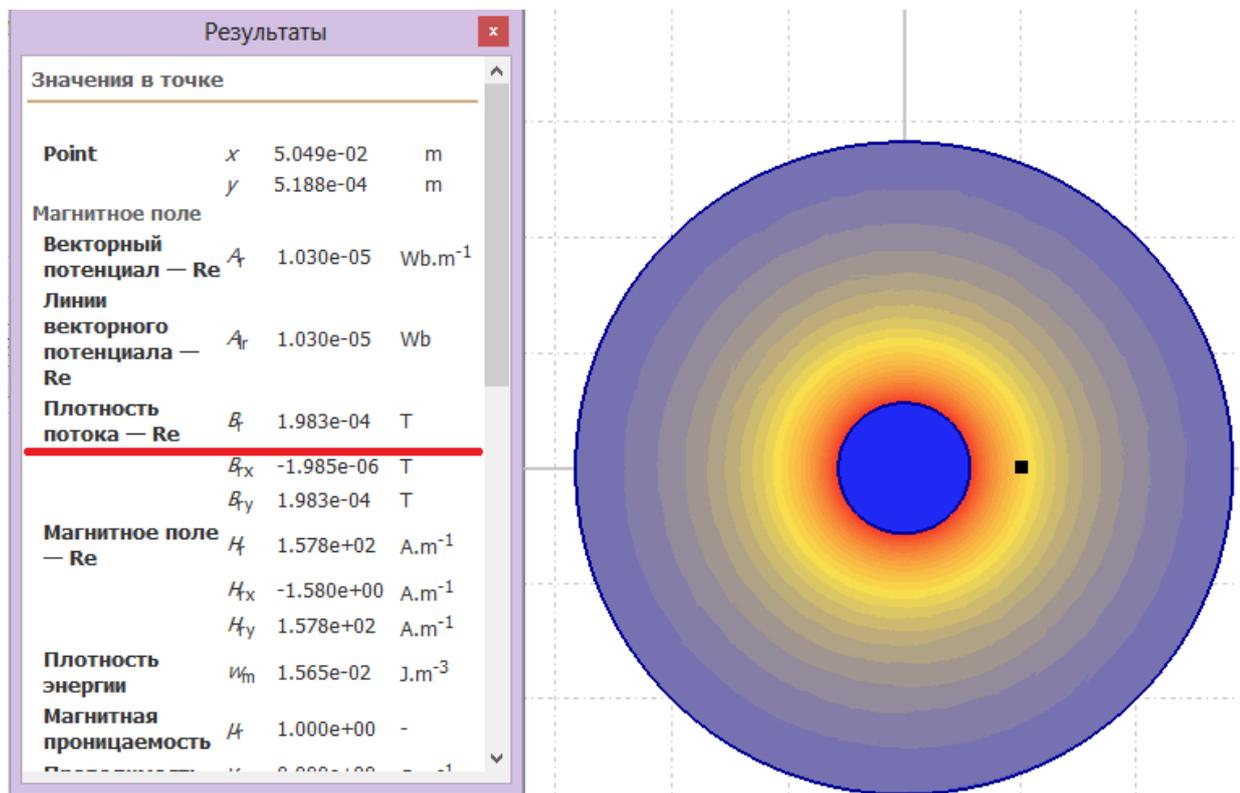


Рисунок 13.19 – Результаты вычислений

Как видим, программа показала значение магнитной индукции  $B$  поля, равную 0,2 мТл. Видим, что расчет аналитическим методом совпадает с расчетами в программной среде Agros2D.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Agros2D.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: по длинному прямому проводу течет ток 30 А, длина большей стороны рамки 70 см.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

### Возможности проектирования поля постоянного магнита в Agros2D

#### Создание виртуальной 2D модели распределения поля постоянного магнита

Запустите Agros 2D в разделе меню «Пуск». После запуска программы нажмите «Файл», затем выберите пункт «Новый» из главного меню и выберите пункт  Magnetic field.

После этого во вкладке «Свойства» в подразделе «Физические поля» появится окно . Нажмите на окно «Магнитное поле». В появившемся окне «Магнитное поле» в графе «Решатель» выберите «Метод Ньютона» и нажмите .

После вкладки «Свойства» нажимаем на вкладку «Препроцессор» . Появится окно «Редактор геометрии» (рисунок 14.1).

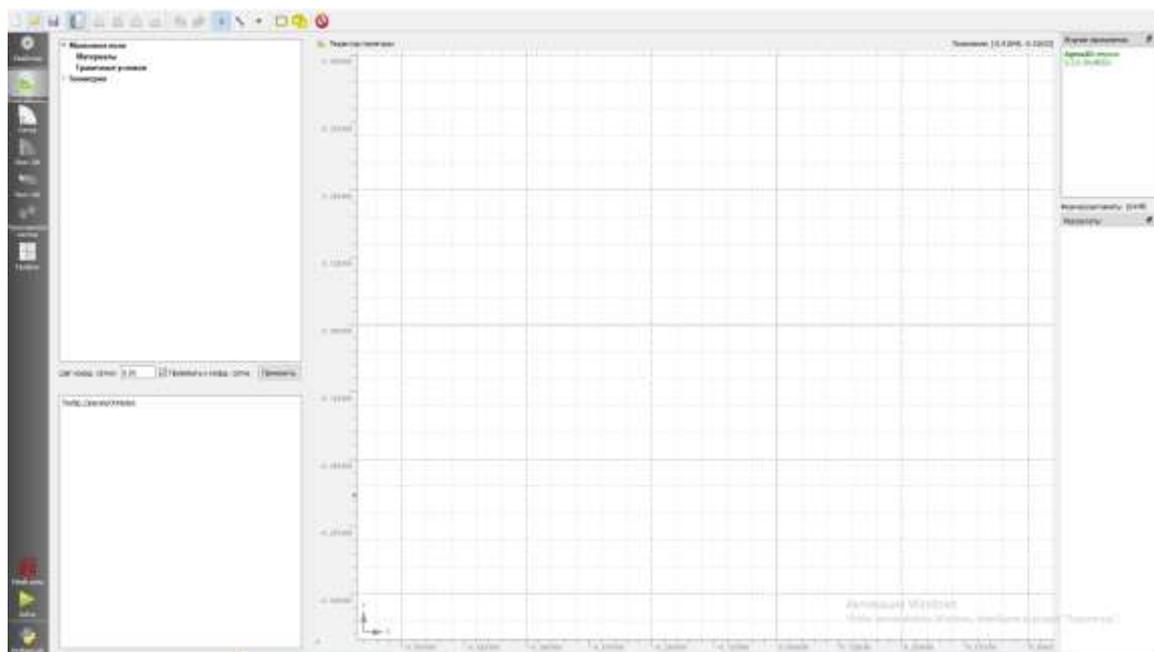


Рисунок 14.1 - Окно «Редактор геометрии»

С помощью комбинации «Ctrl+ левая кнопка мыши» и панели инструментов «Работа над узлами»  и «Работа над ребрами»  постройте макет магнита (координаты узлов представлены в таблице 1), который представлен на рисунке 14.2.

Таблица 1 – Координаты узлов

| X      | Y        |
|--------|----------|
| -0,05  | 0,06     |
| -0,05  | 0,025    |
| -0,05  | 0        |
| -0,05  | -0,005   |
| -0,05  | -0,01875 |
| 0,05   | -0,01875 |
| 0,05   | -0,005   |
| 0,05   | 0        |
| 0,05   | 0,025    |
| 0,05   | 0,06     |
| 0,045  | 0,065    |
| -0,045 | 0,065    |
| -0,03  | 0        |
| -0,03  | 0,025    |
| -0,03  | 0,035    |
| -0,025 | 0,04     |
| 0,025  | 0,04     |
| 0,03   | 0,035    |
| 0,03   | 0,025    |
| 0,03   | 0        |
| -0,15  | 0,15     |
| -0,15  | 0,1      |
| 0,15   | 0,15     |
| 0,15   | -0,1     |

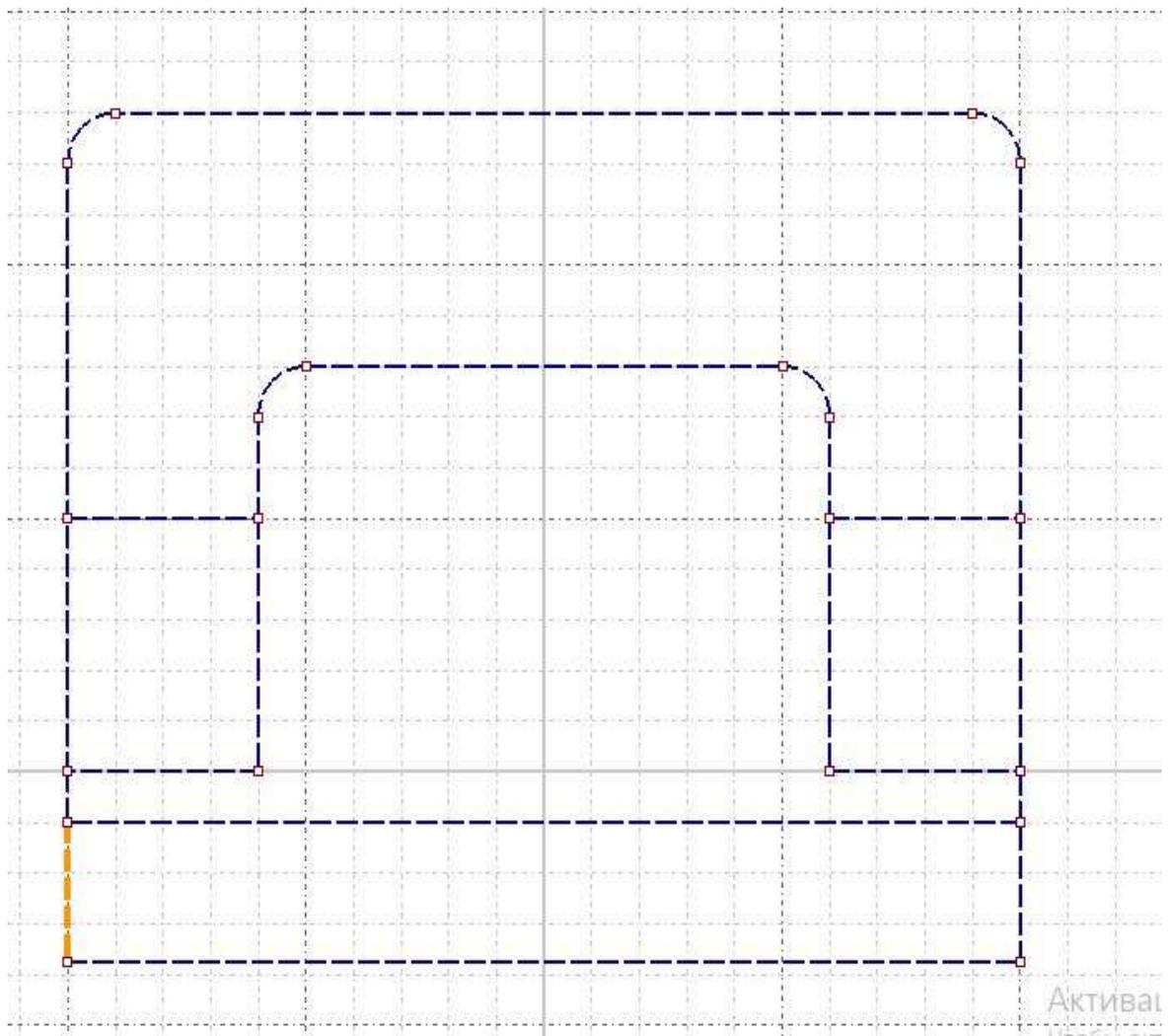


Рисунок 14.2 – Макет магнита

С помощью комбинации «Ctrl + левая кнопка мыши» и панели инструментов «Работа над ребрами»  постройте границу (квадрат) вокруг макета магнита (рисунок 14.3).

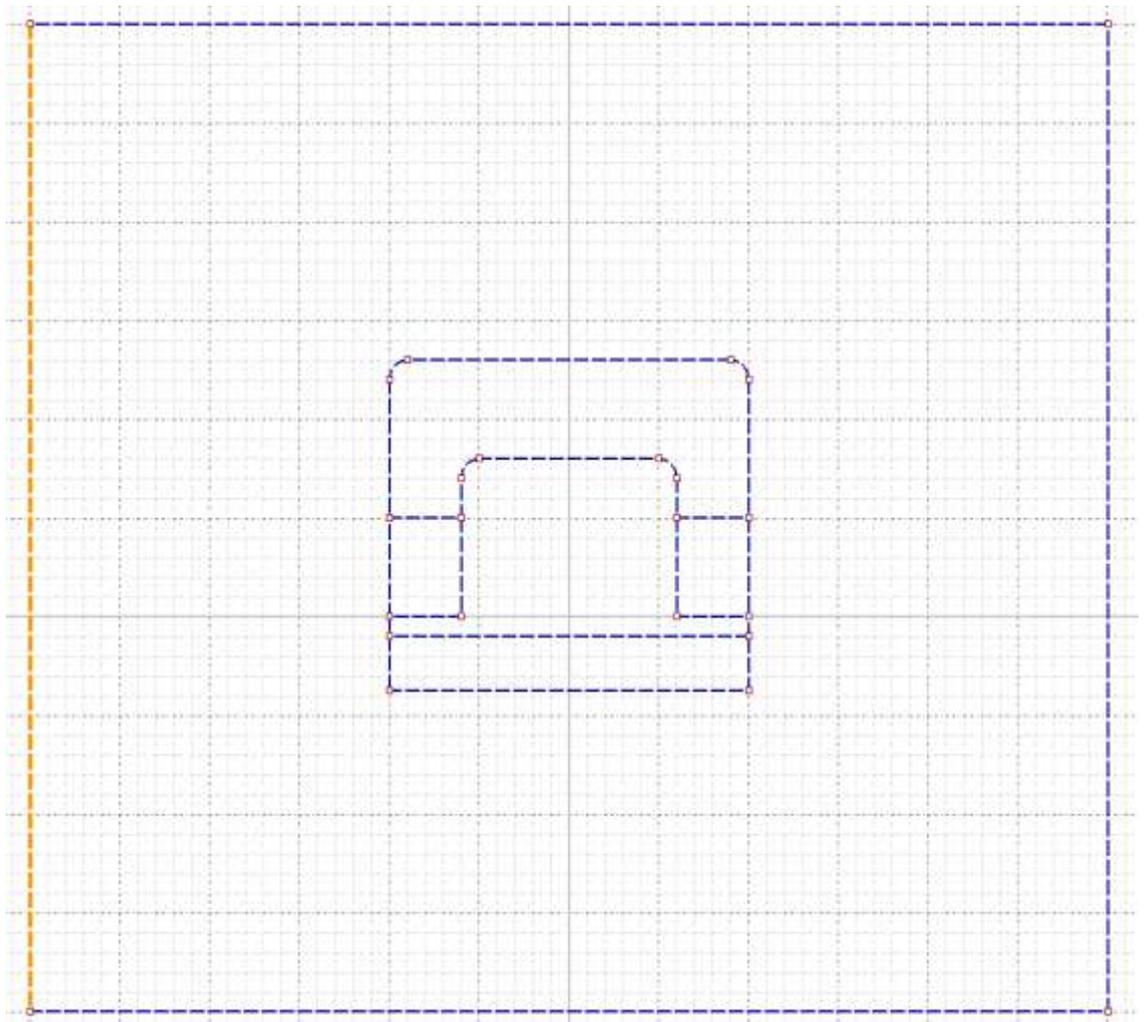


Рисунок 14.3 – Граница (квадрат) вокруг макета магнита

С помощью комбинации «Ctrl + левая кнопка мыши» и панели инструментов «Работа над метками»  поставьте 6 меток как на рисунке 14.4.

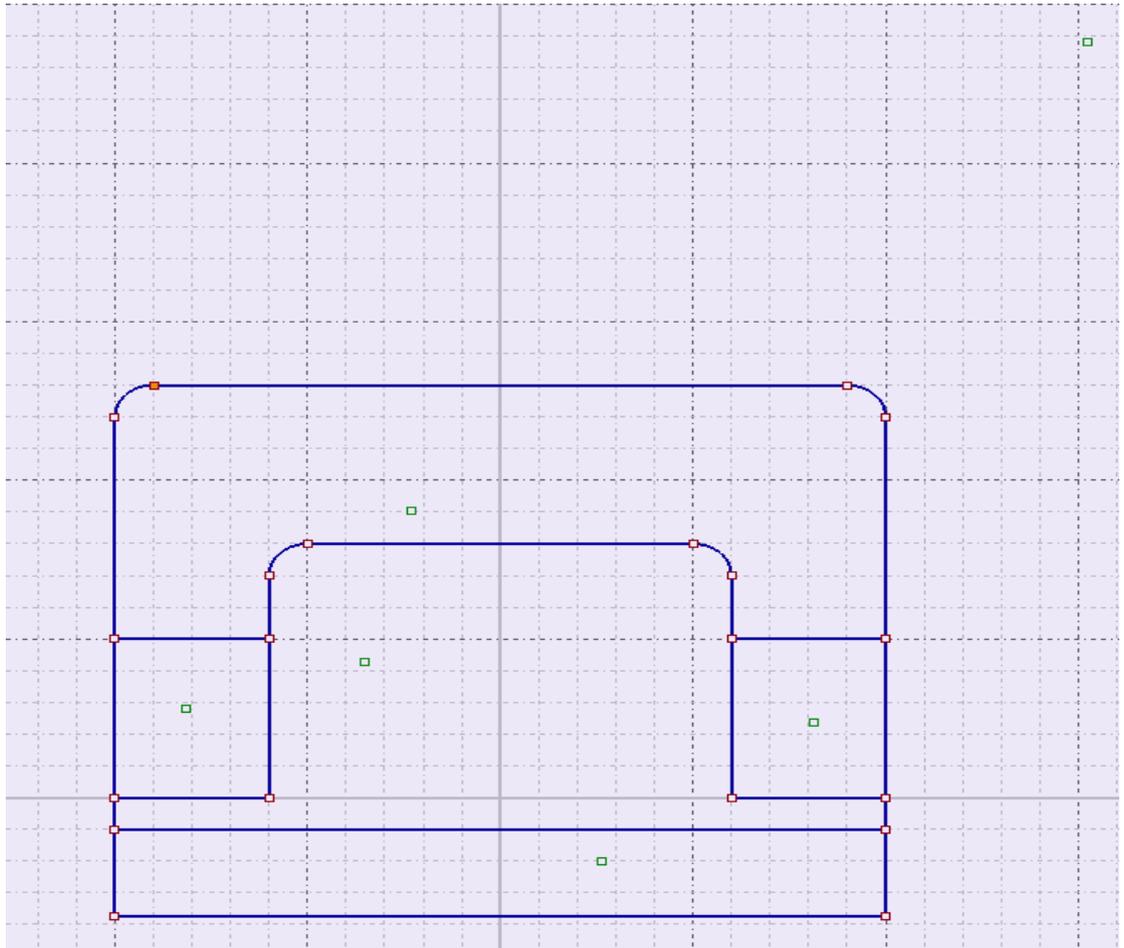


Рисунок 14.4 – Обозначение меток

После построения макета во вкладке «Препроцессор»  в окне «Материалы» правой кнопкой мыши выбираем раздел «New material». В окне «Материал - Магнитное поле» (рисунок 14.5) в строке «Имя» вводим «Iron».

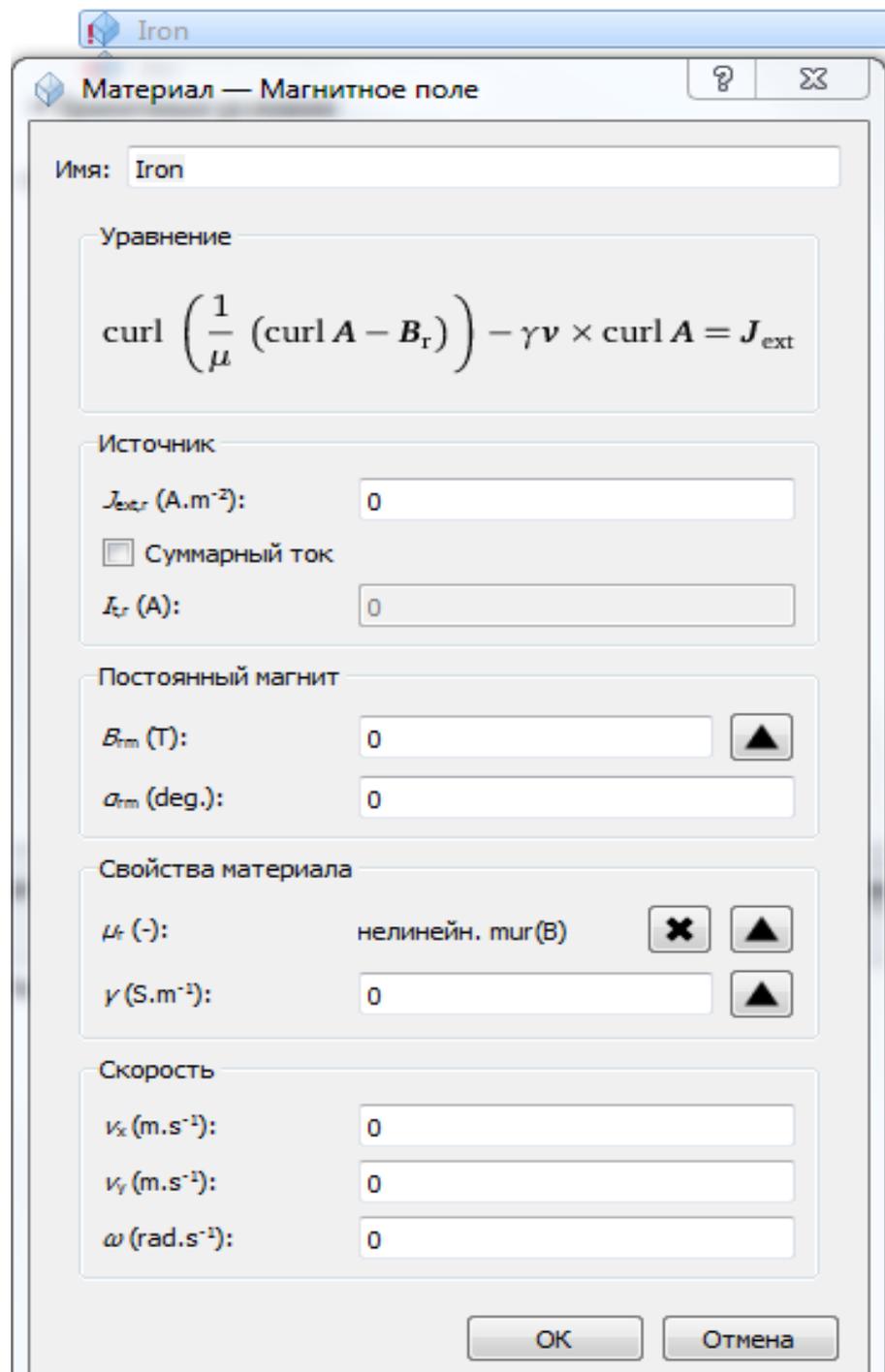


Рисунок 14.5 - Окно «Материал - Магнитное поле»

Затем в строке « $\mu_r$  (-)» нажимаем на знак ▲. Появится окно «Таблица данных» (рис. 14.6).

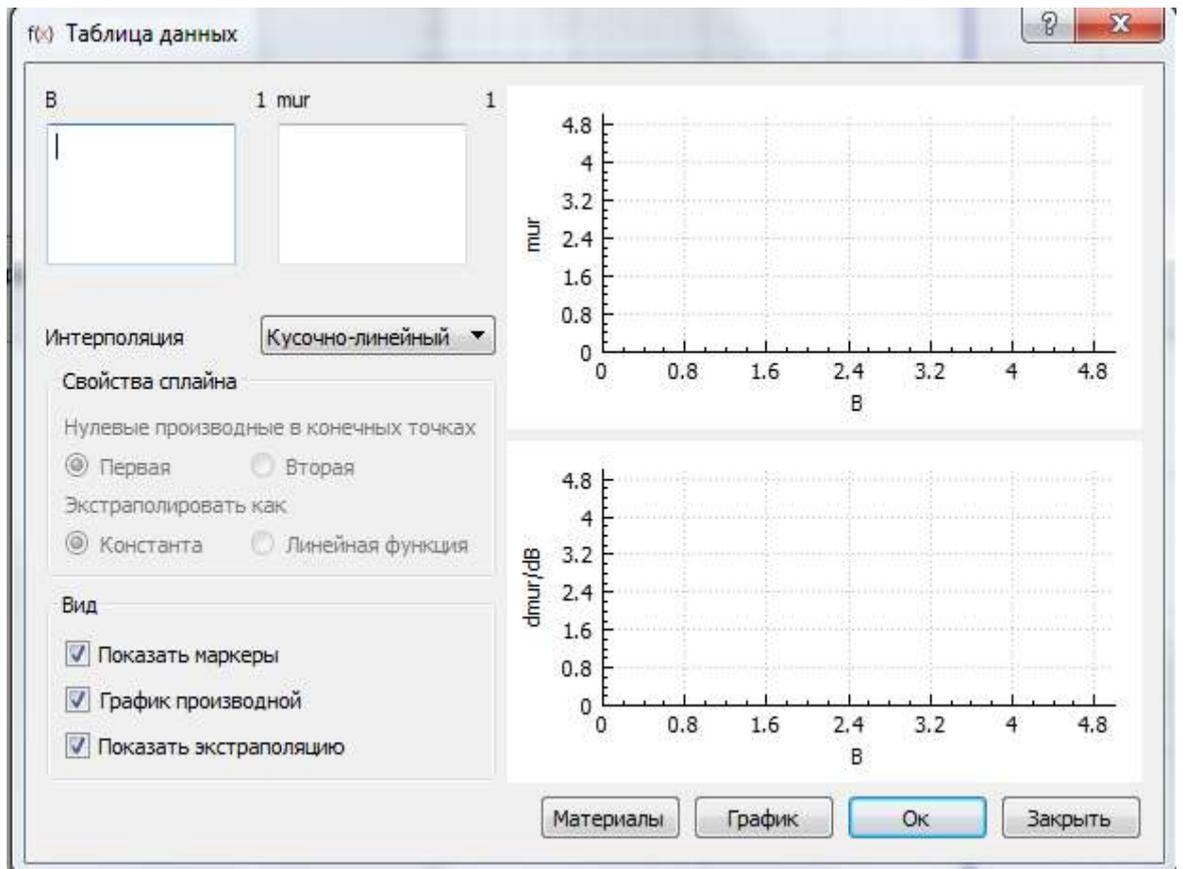


Рисунок 14.6 - Окно «Таблица данных»

В окне «Таблица данных» нажимаем на строку «Материалы». Появляется окно «Библиотека материалов» (рисунок 14.7).

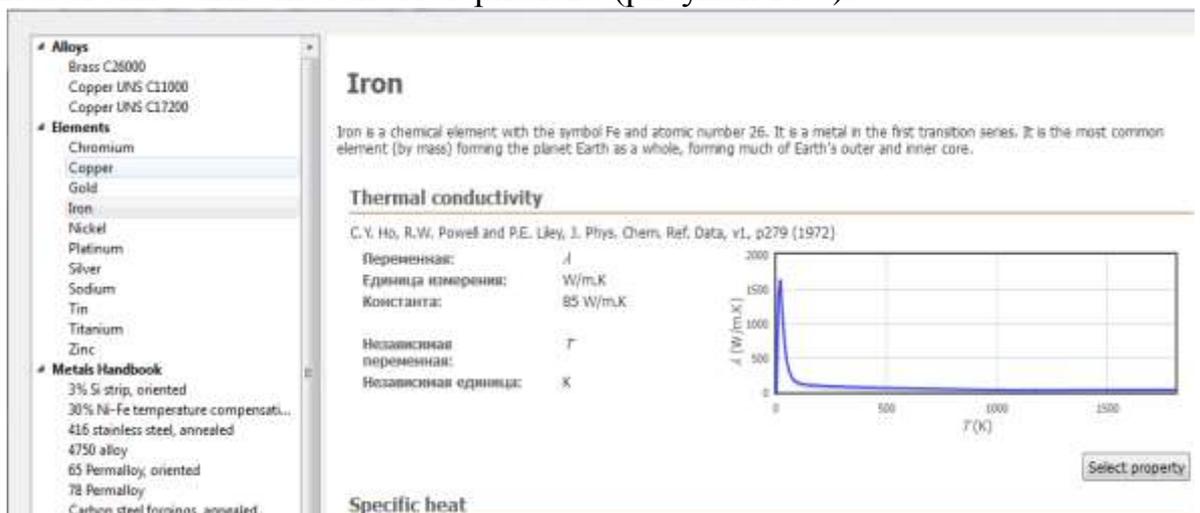


Рисунок 14.7 – Окно «Библиотека материалов»

Выбираем строку «Iron». Справа появится описание данного материала. Ищем строку «Magnetic permeability» (рис. 14.8) и нажимаем на **Select property**.

## Magnetic permeability

Product Reference Guide, Carpenter Technology Corporation

Переменная:  $\mu_r$   
Единица измерения: -  
Константа: 9300 -  
  
Независимая переменная:  $B$   
Независимая единица: Т

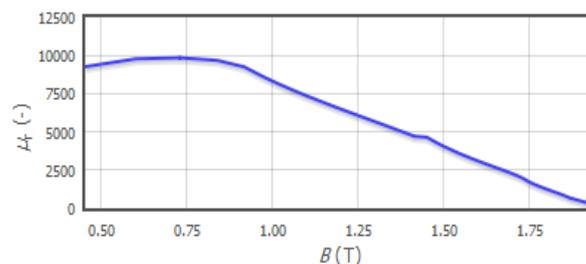


Рисунок 14.8 - Строка «Magnetic permeability»

После нажатия **Select property** программа автоматически вернет в окно «Таблица данных» (рисунок 14.9).

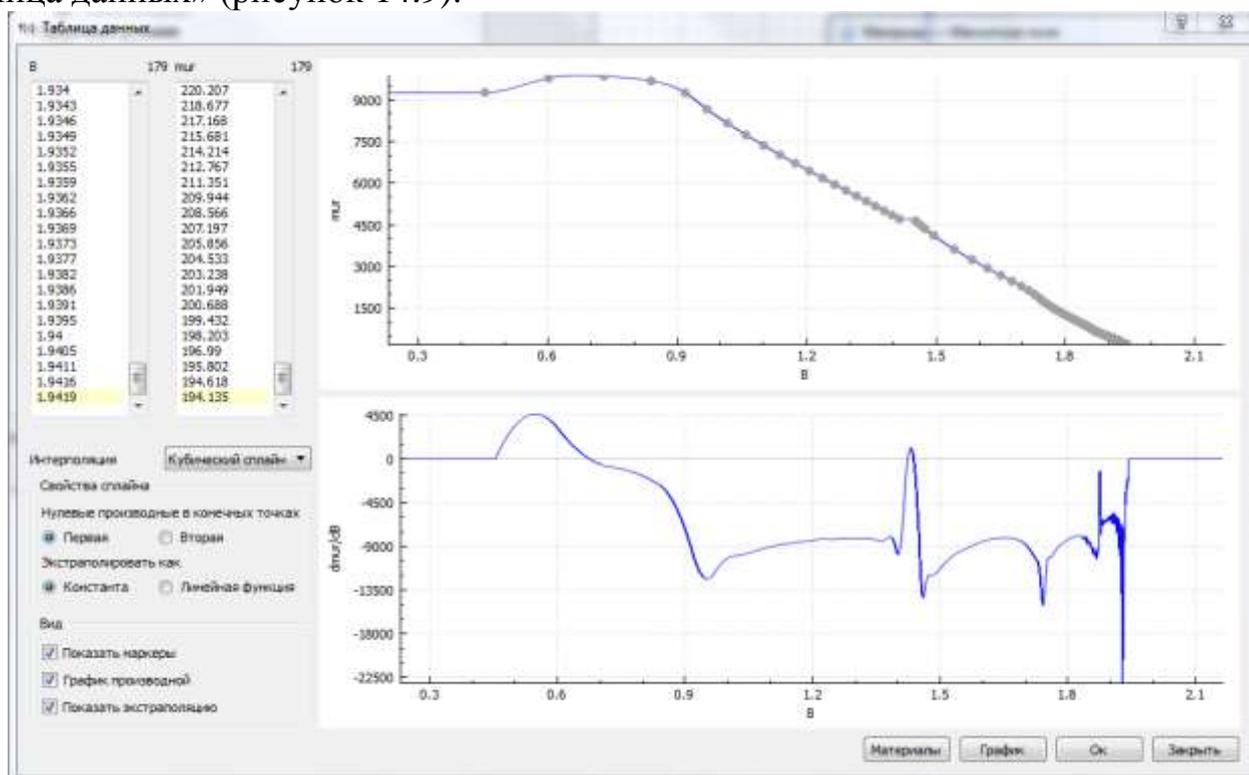


Рисунок 14.9 – Окно «Таблица данных»

В строке «Интерполяция» выбираем **Кубический сплайн** и нажимаем **Ок**.

Далее в окне «Материалы» правой кнопкой мыши выбираем раздел «New material» и вбиваем значения как на рисунке 14.10.

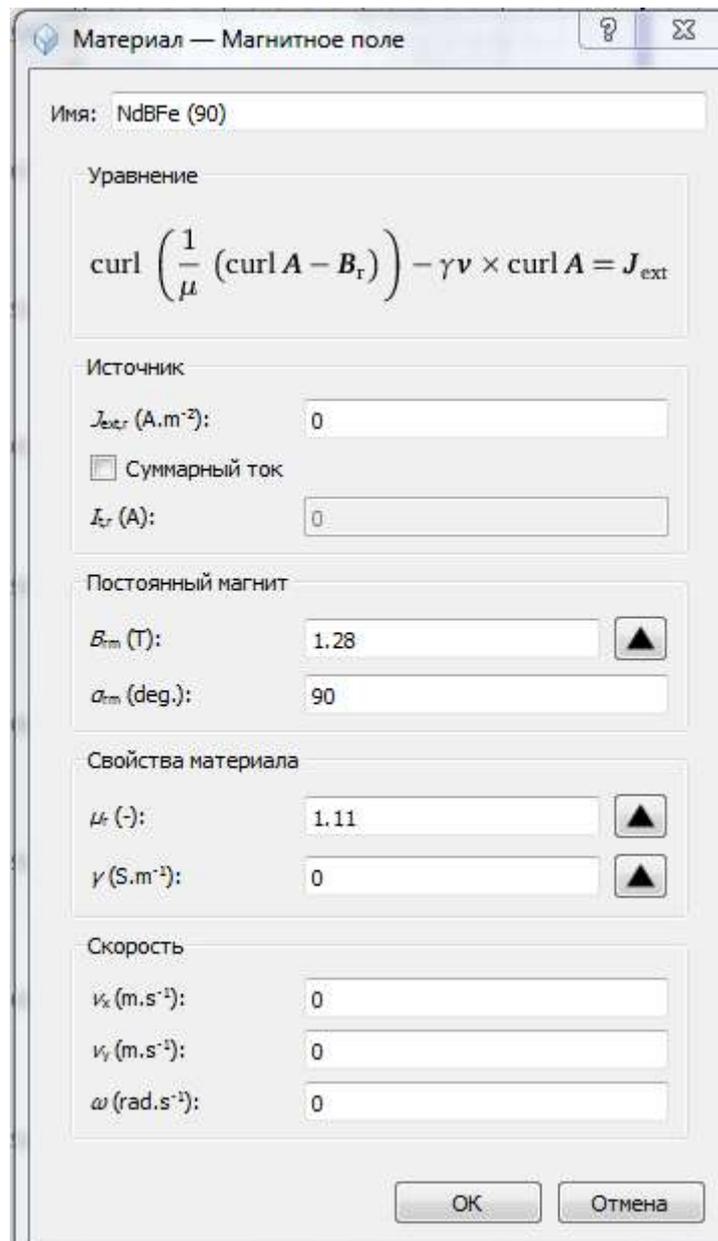


Рисунок 14.10 – Окно значений материала NdFe (90)

Аналогично проделываем для NdFe (-90) и Air (рисунки 14.11, 14.12).

Материал — Магнитное поле ? X

Имя: NdBFе (-90)

Уравнение

$$\text{curl} \left( \frac{1}{\mu} (\text{curl} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \text{curl} \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}$$

Источник

$J_{\text{ext}}$  (A.m<sup>-2</sup>): 0

Суммарный ток

$I_r$  (A): 0

Постоянный магнит

$B_m$  (T): 1.28 ▲

$\alpha_m$  (deg.): -90

Свойства материала

$\mu$  (-): 1.11 ▲

$\gamma$  (S.m<sup>-1</sup>): 0 ▲

Скорость

$v_x$  (m.s<sup>-1</sup>): 0

$v_y$  (m.s<sup>-1</sup>): 0

$\omega$  (rad.s<sup>-1</sup>): 0

OK Отмена

Рисунок 14.11 - Окно значений материала NdBFе (-90)

Материал — Магнитное поле

Имя: Air

Уравнение

$$\text{curl} \left( \frac{1}{\mu} (\text{curl} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \text{curl} \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}$$

Источник

$J_{\text{ext}}$  (A.m<sup>-2</sup>): 0

Суммарный ток

$I_{\text{cr}}$  (A): 0

Постоянный магнит

$B_m$  (T): 0 ▲

$\sigma_m$  (deg.): 0

Свойства материала

$\mu_r$  (-): 1 ▲

$\gamma$  (S.m<sup>-1</sup>): 0 ▲

Скорость

$v_x$  (m.s<sup>-1</sup>): 0

$v_y$  (m.s<sup>-1</sup>): 0

$\omega$  (rad.s<sup>-1</sup>): 0

OK Отмена

Рисунок 14.12 - Окно значений Air

В окне «Граничные условия» правой кнопкой мыши выбираем раздел «New boundary condition» и вбиваем значения как на рисунке 14.13.

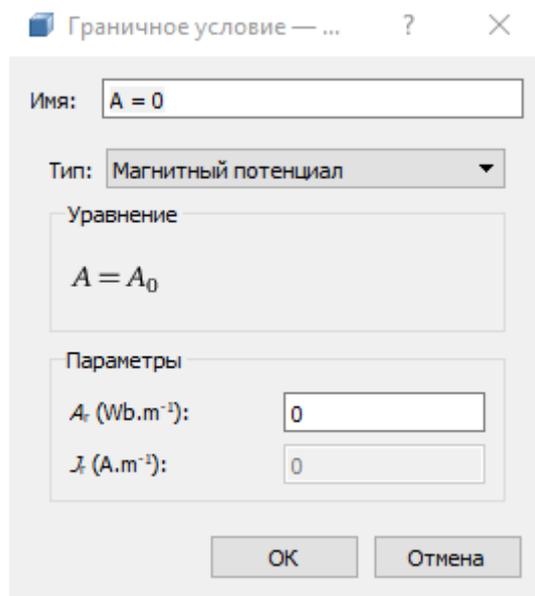


Рисунок 14.13 - Окно значений  $A=0$

С помощью двойного нажатия левой кнопки мыши нажмите на 1 метку  в окне «Редактор геометрии»(рис. 14.14).

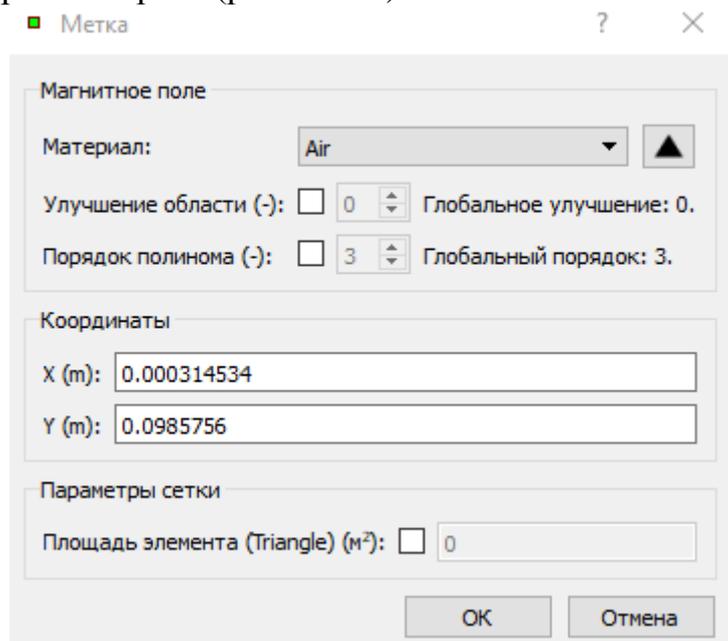


Рисунок 14.14 – Окно настроек «Метка»

Аналогично проставляем оставшиеся 5 меток  (рисунок 14.15).

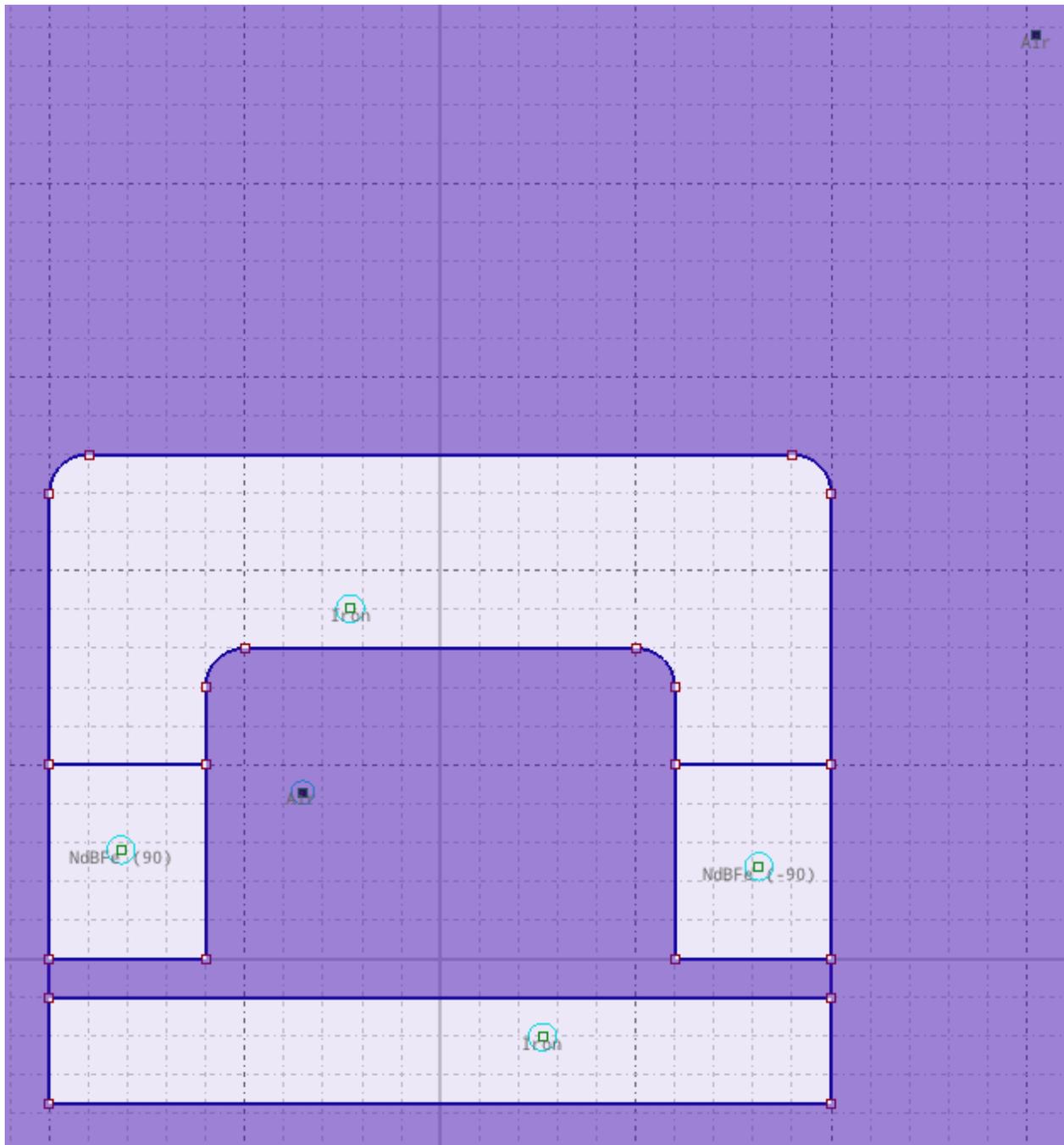


Рисунок 14.15 – Значения меток

Выберите панель инструментов «Работа над ребрами» . С помощью этой панели выделите границы (квадрат) вокруг макета магнита и нажмите «Space». В появившемся окне выберите строку « $A=0$ » (рисунок 14.16).

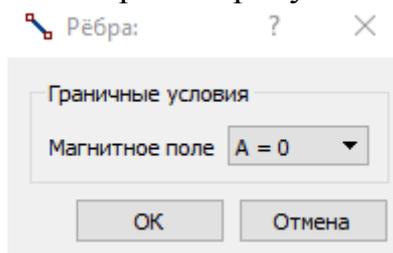


Рисунок 14.16 – Окно «Ребра»

Затем нажимаем на «MeshArea»  (рисунок 14.17).

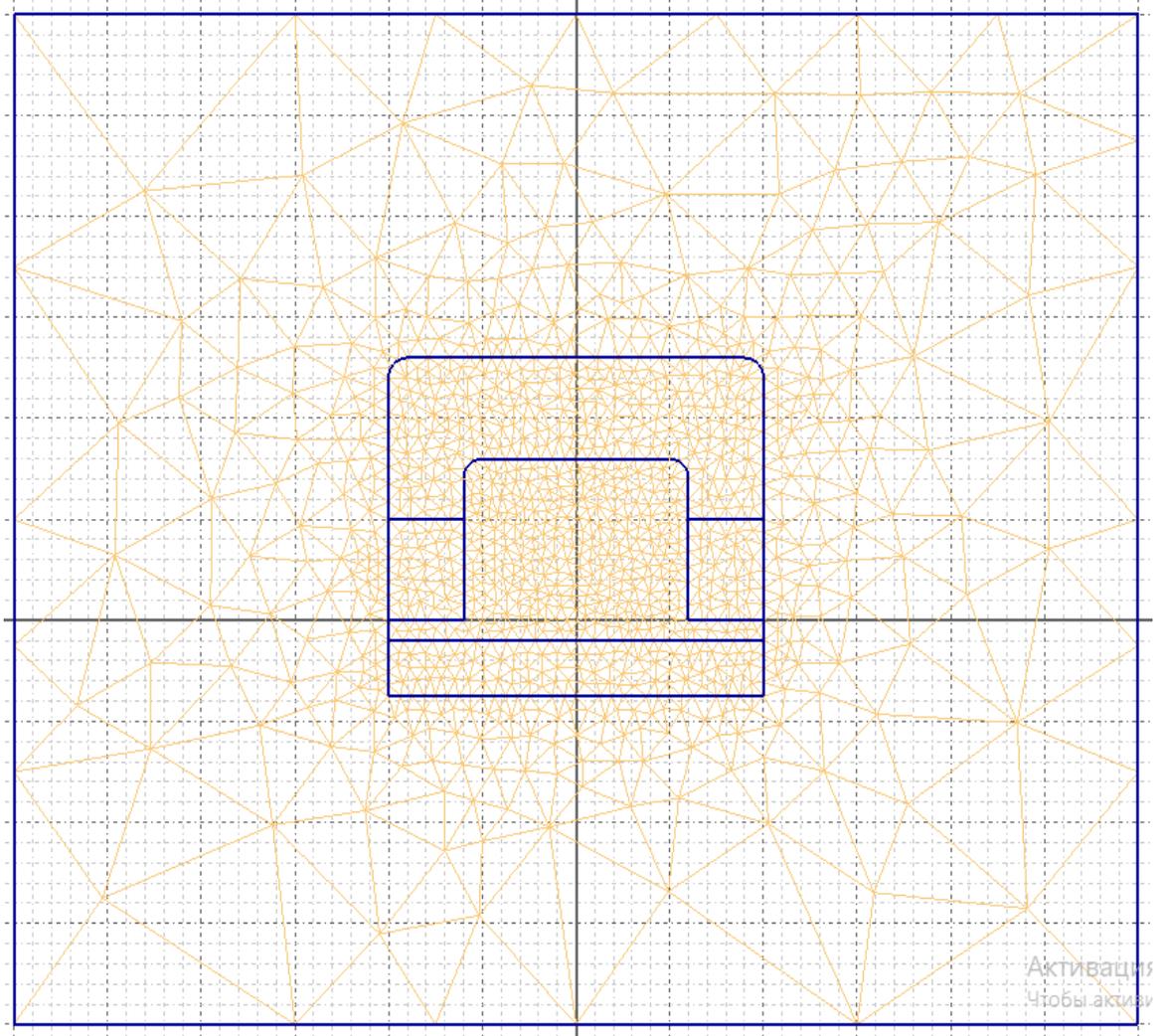


Рисунок 14.17– Магнит после нажатия «MeshArea»

После «MeshArea»  нажимаем на «Solve»  (рисунок 14.18).

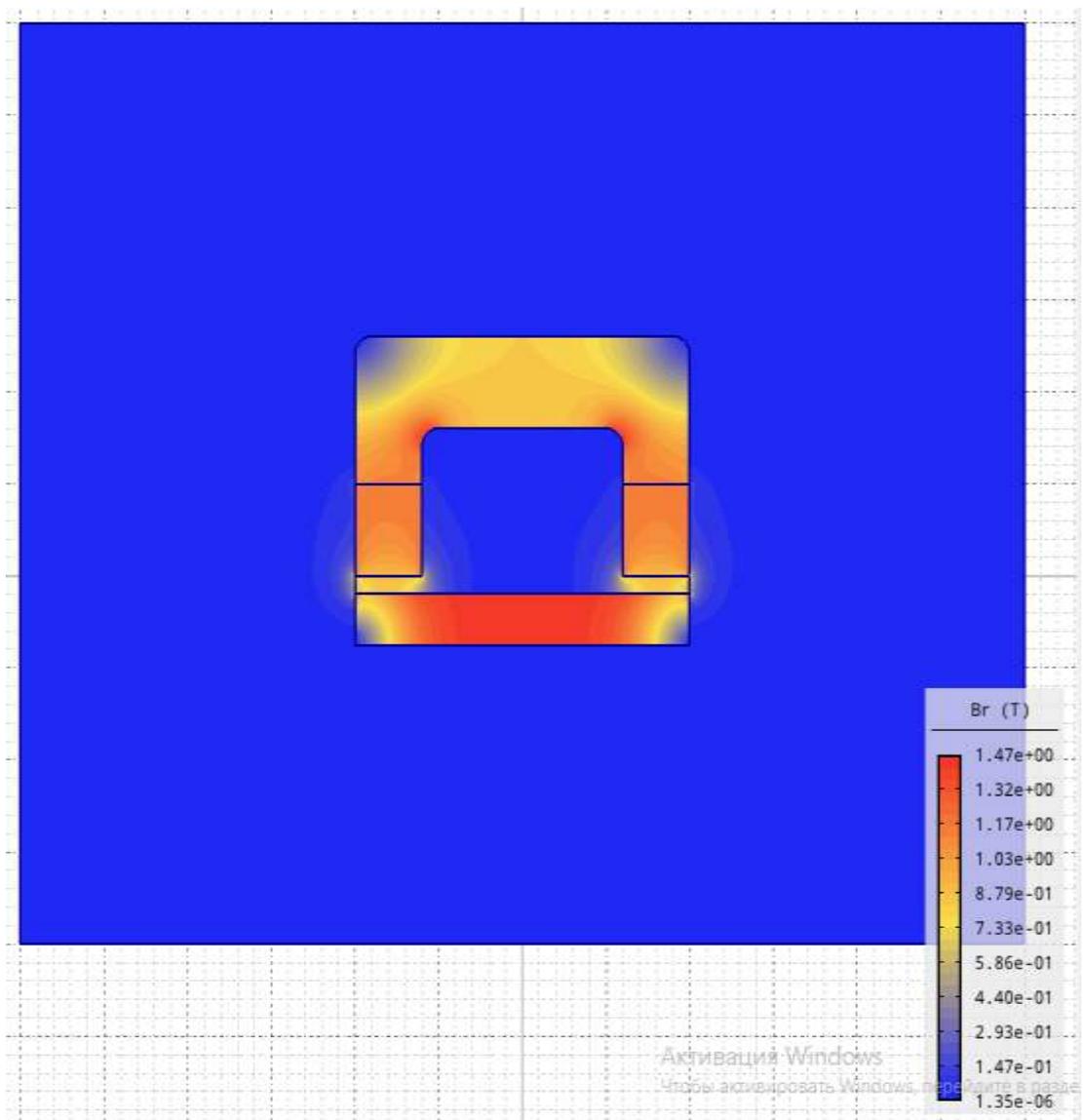


Рисунок 14.18 – 2D модель магнита

В окне «Настройки постпроцессора» вводим значения как на рисунке 14.19.

Настройки постпроцессора

Физическое поле: Магнитное поле

Постпроцессор 2D

Скалярный вид

Контур

Векторы

Контурное поле

Переменная: Векторный потенциал — Re

Векторное поле

Переменная: Остаточная плотность потока

Кол-во вект.: 100  Пропорциональный

Масштаб: 0.60  Яркость (ч/б)

Тип: Стрелка

Центр: Хвост

Смещение

Деформация формы

Рисунок 14.19 – Настройки постпроцессора

После ввода значений нажимаем  . Конечное 2D изображение магнита представлено на рисунке 14.20.

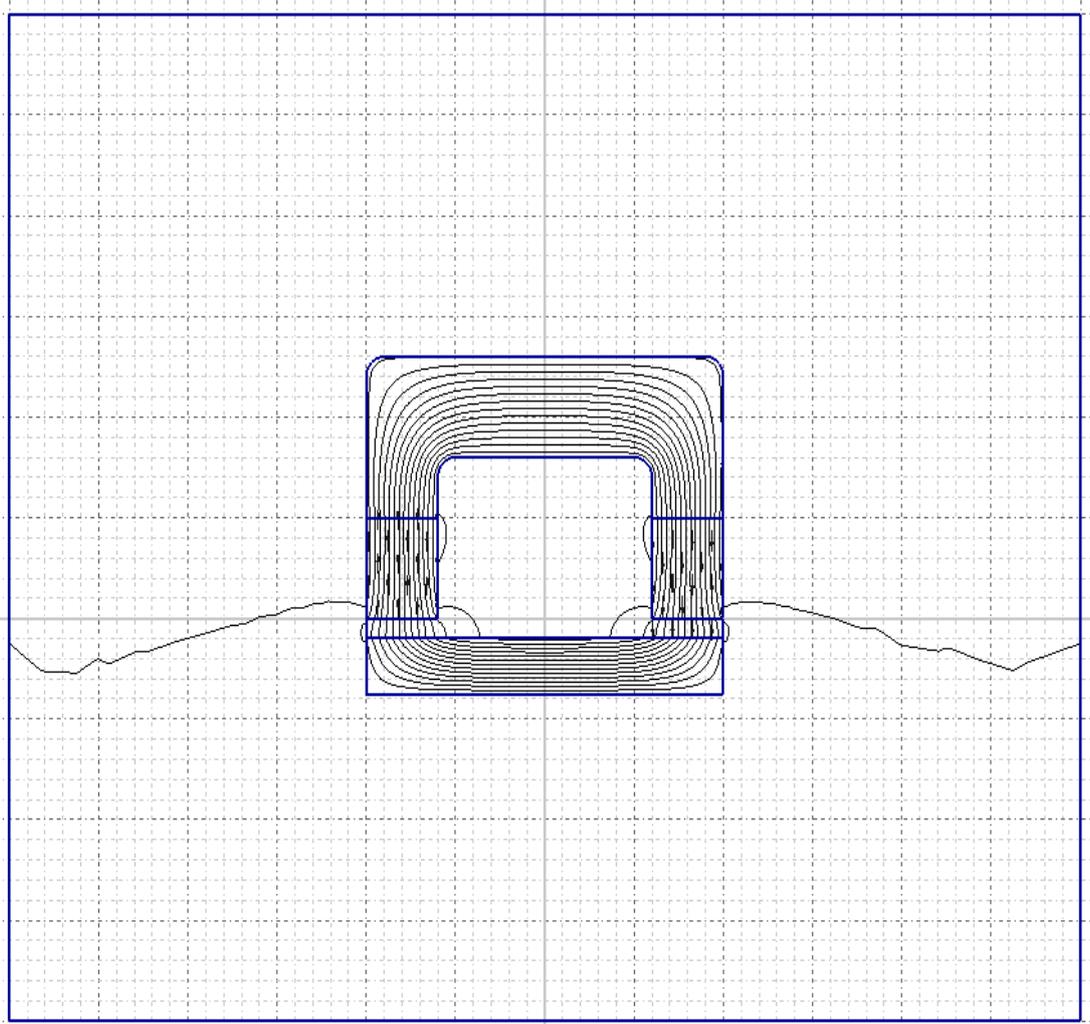


Рисунок 14.20 – 2D изображение магнита после настройки постпроцессора

### Задание

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Agros2D.

## Список используемых источников

1. Agros2D - это ПО с открытым исходным кодом для численного решения двумерных связанных задач в технических дисциплинах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Agros2D> (Дата обращения: 01.02.2022).
2. Agros2D [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.agros2d.org/> (Дата обращения: 01.02.2022).
3. Расчет теплого пола в Excel и Agros2D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://al-vo.ru/teplotekhnika/raschet-teplogo-pola-v-excel-i-agros2d.html> Agros2D функции и основные возможности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hmong.ru/wiki/Agros2D> (Дата обращения: 01.02.2022).
4. Чертов А.Г., Задачник по физике [Текст]: учебное пособие для втузов/ А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2003. – 640 с.