

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 15.05.2022 01:50:23  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11caabbf73e943df4a4851fde56d089

## МИНОБРНАУКИ 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 (1 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 (1 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. 68 с.: Библиогр.: с. 68.

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 системах автоматизированного проектирования FEMM, Agros2D, Autodesk Inventor.

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. 4,38. Уч.-изд. л. 3, 6 Тираж 50 экз. Заказ 730. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Анализ напряжений стального стержня при перпендикулярной нагрузке в Autodesk Inventor

Autodesk Inventor позволяет выполнять расчет детали на прочность. Расчет выполняется методом конечных элементов. Для этого нам нужно создать новую деталь. Нарисуем окружность диаметром 20 мм с центром в начале координат.

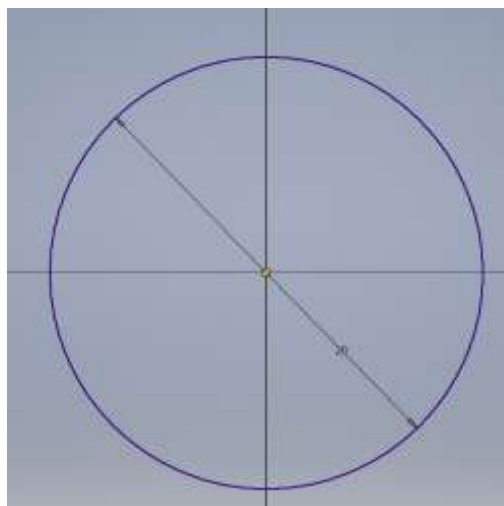


Рисунок 1.1 – Окружность 20 мм с центром в начале координат

Выполним операцию "Выдавливание" со значением 300 мм.



Рисунок 1.2 – Операция "Выдавливание" со значением 300 мм

Назовем деталь "Стержень" и сохраним. На вкладке "Среды" выбираем "Анализ напряжений"

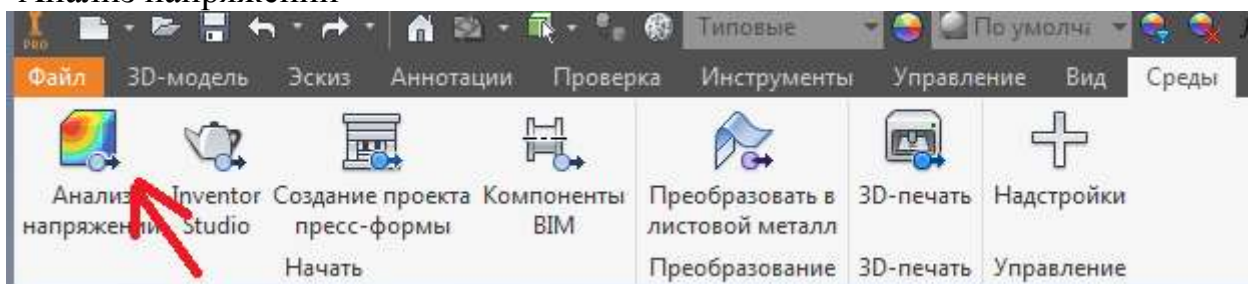


Рисунок 1.3 – Анализ напряжений

На ленте становится доступно меню "Анализа напряжений". Нажмем "Создать исследование"

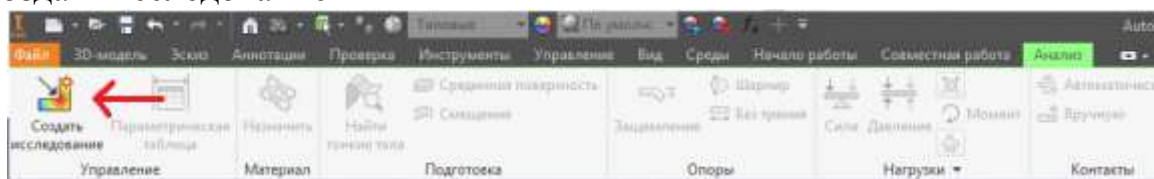


Рисунок 1.4 - Создать исследование

Назовем его "Расчет на изгиб". Далее назначим материал, из которого состоит стержень. Для этого нажимаем "Назначить материал" и назначаем в выпадающем меню "Переопределить материал" - сталь.

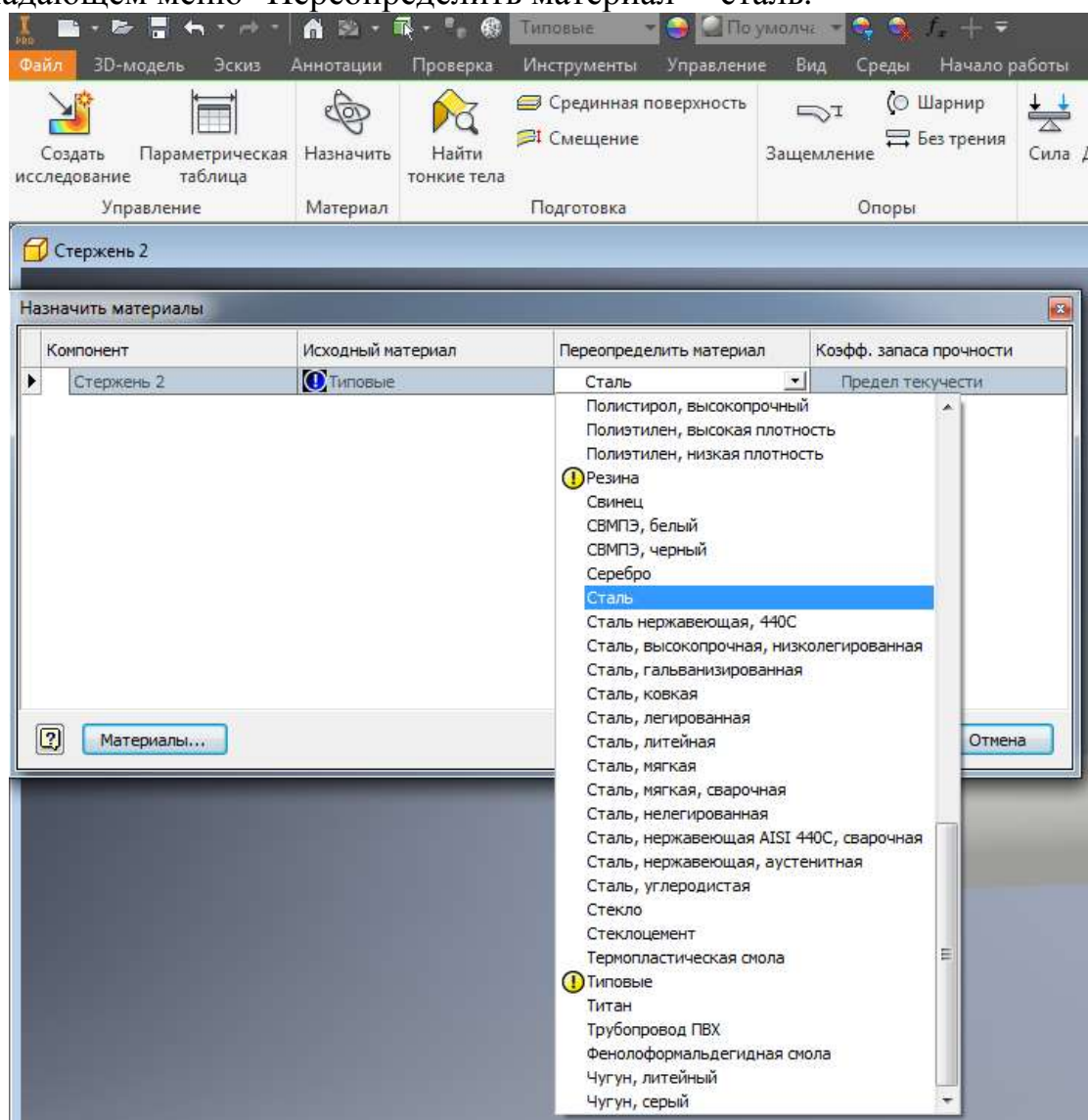


Рисунок 1.5 – Назначение материала

Далее укажем зависимость для расчета. Выберем "Зависимость фиксации" и укажем на торцевые области стержня.

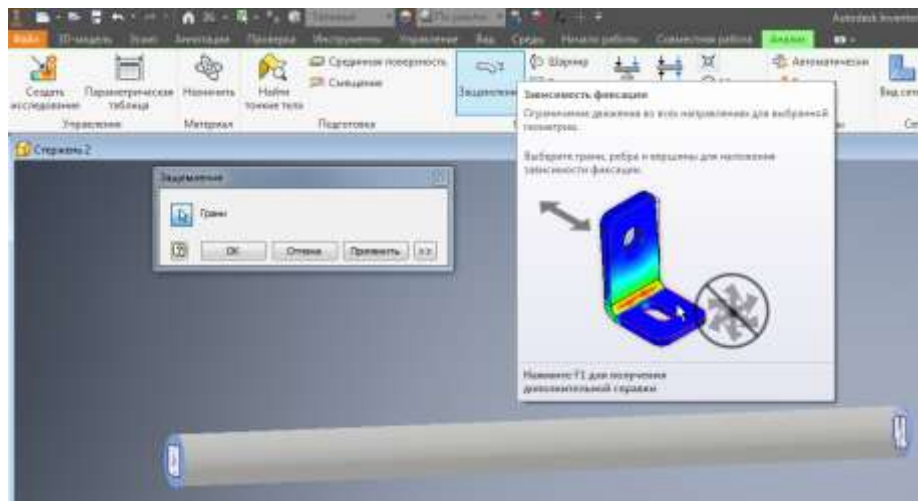


Рисунок 1.6 - Зависимость фиксации  
На панели "Нагрузки" выберем "Сила"

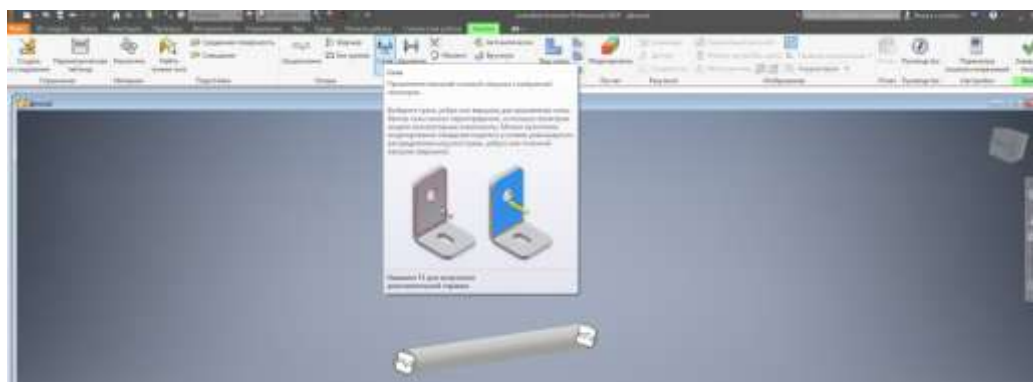


Рисунок 1.7 - Сила

Положение действующей силы укажем на поверхности стержня.  
Введем точное значение силы - 1000 Н.

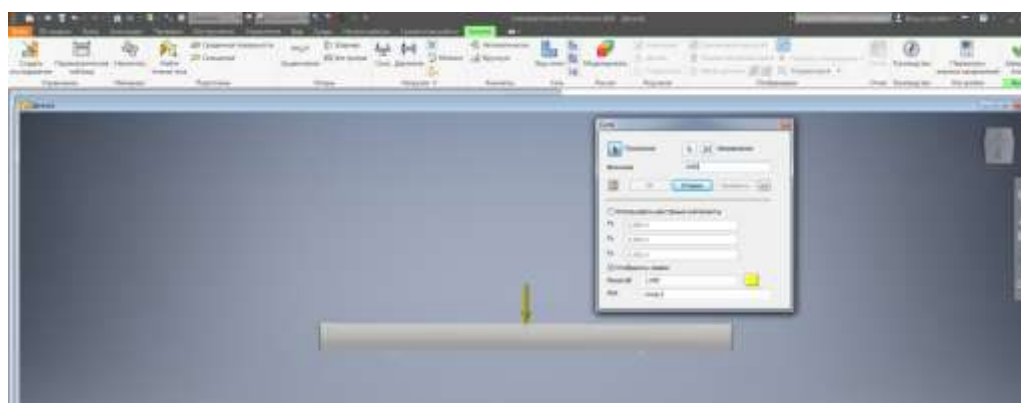


Рисунок 1.8 - Положение и значение силы

Для выполнения расчет нажимаем "Моделировать"

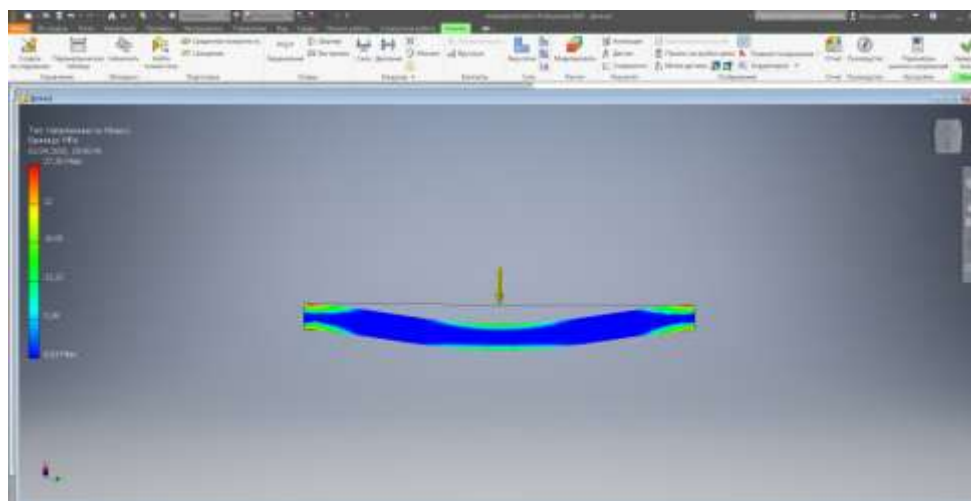


Рисунок 1.9 - Результат расчета

Так же можно выбирать "множитель" для более наглядного просмотра результатов.

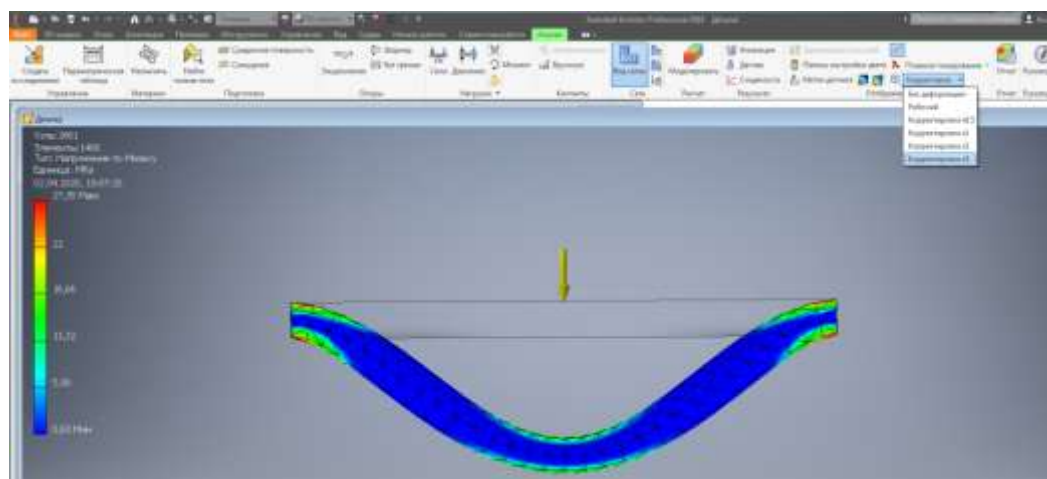


Рисунок 1.10 - Результат расчета с "множителем"

### Задание

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в Autodesk Inventor.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: диаметр торца стержня 10 мм, длина 200 мм, прилагаемая в центре сила 500 Н.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Расчет параметров и визуализация поля соленоида без сердечника в FEMM

**Цель работы:** отработка навыков моделирования и расчёта физических параметров электромагнитных компонентов в программной среде FEMM, а также получение представлений о пространственном распределении магнитного поля соленоида.

**Программное обеспечение:** FEMM ([Finite Element Method Magnetics](#)).

#### Теоретическое введение

Программа Finite Element Method Magnetics (магнитные расчеты способом конечных элементов, сокращенно FEMM) позволяет проводить на персональных компьютерах расчет осесимметричных и плоскопараллельных стационарных/квазистационарных магнитных, а также стационарных электростатических полей. Пакет позволяет определять их цепные и полевые параметры и строить картины. Преимуществами рассматриваемого ПО также является лёгкость освоения.

Основная часть программы состоит из трех модулей: графического препроцессора, решателя и графического постпроцессора. Работа с пакетом при разработке новой модели начинается с запуска препроцессора.

1) Первый этап – геометрические построения исследуемых объектов в полярных или декартовых координатах. Геометрия объекта также может быть импортирована из сторонних графических пакетов, таких как CorelDraw или AutoCAD.

2) Второй этап – задание для частей/блоков объекта свойств материалов (в том числе кривых намагничивания) и ввод граничных условий (Дирихле, Неймана, смешанных, для границ со скин-эффектом, периодичности и антипериодичности, специальных).

3) После этого начинается автоматическая работа решателя, строящего сетку конечных элементов и обчисляющего параметры модели.

4) После окончания расчетов запускается постпроцессор, при этом создаются зонные картины полей: для стационарного магнитного поля – линий магнитного потока, для квазистационарного – линий действительного значения векторного магнитного потенциала. Параметры полей можно просмотреть в любой точке области, а в определенных зонах оценить ряд интегральных величин: магнитных потоков, индуктивностей, магнитных напряжений и т. д.

#### Использование программного пакета FEMM для расчёта параметров магнитного поля

Рассчитать параметры и визуализировать поле соленоида без сердечника (внутри воздух).

Пусть катушка, изображенная на рисунке 1, имеет внутренний диаметр 1 дюйм, внешний диаметр 3 дюйма и длину 2 дюйма. Катушка состоит из 1000 витков медной проволоки (марка меди 18 AWG). По проводу катушки течет постоянный ток 1 Ампер.

Так как задача осесимметричная для моделирования в FEMM достаточно задать геометрию фрагмента сечения катушки вдоль ее оси (рисунок 2.1).

Ось  $r$  направлена по радиусу соленооида от оси катушки ( $r = 0$ ) горизонтально вправо, в указанном сечении ток течет от наблюдателя.

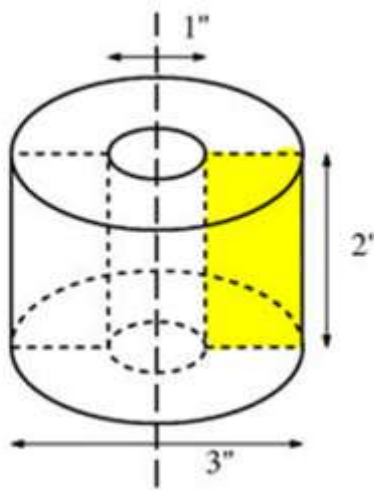


Рисунок 2.1 - Катушка с воздушным сердечником

### 1.1 Создание новой модели


Запустите приложение FEMM в меню «Пуск». Настройки по умолчанию вызовут пустое окно с минимальной строкой меню.

Выберите **New** в главном меню. Появится диалоговое окно с выпадающим списком, позволяющим выбрать тип нового документа, который будет создан. Выберите пункт **Magnetics Problem** и нажмите кнопку **OK**. Будет создана новая задача, и появится ряд новых кнопок панели инструментов.

### 1.2 Задаем тип задачи (уравнения магнитостатики)


Необходимо сообщить программе тип решаемой задачи. Для этого выберите **Problem** в главном меню. Откроется диалоговое окно «Определение проблемы». В **Problem Type** установите **Axisymmetric**. Убедитесь, что единицы длины **Length Units** установлены в дюймах **Inches**, а частота **Frequency (Hz)** установлена в 0. (Так как проблема является осесимметричной, ввод глубины (Depth) не требуется, и это поле редактирования отображается серым цветом. В этом случае вертикальная ось является осью вращения для задачи. Ось  $r$  проходит горизонтально, а ось  $z$  - вертикально.) Нажмите кнопку **OK**.

### 1.3 Рисуем катушку


Переключите режим узлов, нажав на кнопку «Работа с узлами» на панели инструментов изображения . Разместите узлы в точках (0.5; -1),



(1.5; -1), (1.5;1) и (0.5;1), определяющих размеры катушки. Узлы можно размещать, перемещая указатель мыши в нужное место и нажимая левую кнопку мыши, или нажимая клавишу <ТАВ> и вручную вводя координаты точки через всплывающее диалоговое окно.



Выберите изображение кнопки «Работа с сегментами», чтобы можно было нарисовать линии, соединяющие точки . При выборе узлов, определяющих катушку, щелчками левой кнопки мыши в последовательности, можно получить линии между каждым из узлов и получить большой соединенный блок (прямоугольное сечение катушки).

#### 1.4 Размещение меток блоков

Теперь нажмите на кнопку панели инструментов «Использовать метки блоков», обозначенную изображением концентрических зеленых кругов . Поместите метку блока в области катушки и поместите её вне области катушки. Как и узловые точки, метки блоков могут быть размещены либо щелчком левой кнопки мыши, либо с помощью вызова диалогового окна <ТАВ>. Программа использует метки блоков для связи материалов и других свойств с различными замкнутыми областями в геометрии задачи. Далее мы определим некоторые свойства материала, а затем вернемся и свяжем их с определенными метками блока.

Примечание: если включена привязка к сетке, то иногда может быть трудно разместить метку блока в пустом пространстве. Если это так, отключите привязку к сетке, отключив кнопку на панели инструментов с точкой и стрелкой.


#### 1.5 Задание материалов модели

Выберите **Properties**, затем **Materials Library** в главном меню. Перетащите элемент  Air из библиотеки материалов в материалы модели, чтобы добавить его в текущую модель. Перейдите в папку  Copper AWG Magnet Wire и перетащите  18 AWG в «Материалы модели». Нажмите на **OK**.

#### 1.6 Задание параметров цепи для катушки

Выберите **Properties**, затем **Circuits** в главном меню. В появившемся диалоговом окне нажмите кнопку **Add Property**, чтобы создать новое свойство схемы. Назовите цепь, заменив New Circuit (новое имя цепи) на Coil. Укажите, что витки в обмотке соединены последовательно, выбрав переключатель «Series». Введите значение тока в цепи 1 А (Circuit Current). Нажмите **OK** для диалогового окна «Свойства цепи» и «Определение свойства».

#### 1.7 Связывание свойств с метками блоков


Щелкните правой кнопкой мыши на узел метки блока в области воздуха вне катушки. Метка блока станет красной, означая, что она выбрана. Нажмите <ПРОБЕЛ>, чтобы «открыть» метку выбранного блока (вместо нажатия клавиши пробела можно использовать изображение кнопки панели инструментов «Открыть окно свойств») . Появится диалоговое окно, содержащее свойства, назначенные выбранной метке. Установите **Air** в **Block type**. Обычно достаточно принять плотность сетки по умолчанию,

установив флажок  Let Triangle choose Mesh Size . Если требуется более мелкая сетка, можно снять флажок и ввести в поле Mesh size размер сетки. Параметр размера ячейки определяет ограничение на максимально возможный размер элементов, разрешенный в соответствующем разделе. Сетка пытается заполнить область почти равносторонними треугольниками, у которых стороны примерно равны длине указанного параметра Mesh size . Нажмите на  . Метка блока будет помечена как  Air .

Выберите и откройте узел метки блока внутри области катушки. Установите для этого типа блока значение 18 AWG . Мы хотим назначить токи, протекающие в этой области, поэтому выберите в поле In Circuit схему Coil из выпадающего списка . Поле Number of Turns (число витков) станет активным, так как ранее для области выбрана схема последовательного типа «Series». Введите 1000 в качестве числа витков для этой области, что означает, что в области, заполненной 1000 витками, витки навиты против часовой стрелки (положительное направление). Нажмите на  .

Примечание: если бы мы хотели обозначить, что витки навиты против часовой стрелки, мы могли бы указать число витков, равное  $-1000$ .

### 1.8 Создание граничных условий

Конечно, хотелось бы найти поле катушки в неограниченном пространстве, на которое не влияет соседняя вычислительная граница. Однако метод конечных элементов всегда требует решения задач в ограниченной области. Для имитации открытых границ вызовите мастера построения открытых границ, для этого нажмите на кнопку «Create IABC Open Boundary» на панели инструментов  . Смотри рисунок 2.2 ниже.

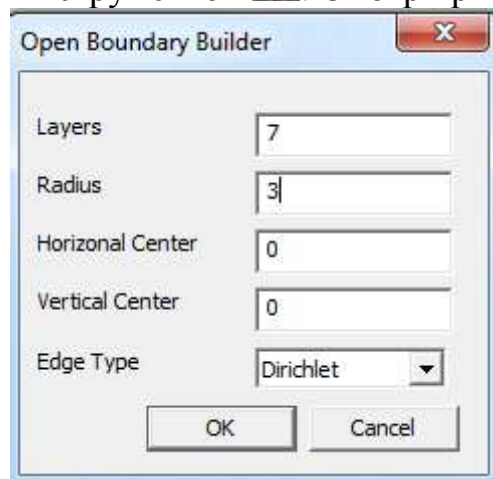


Рисунок 2.2 - Мастер построения открытых границ

Как правило, достаточно просто принять предложенные граничные параметры, нажав  . На для данной задачи вместо предложенного значения зададим радиус 3 дюйма (внешний радиус катушки). Центр (0,0) совпадает с началом координат сечения катушки.

Заданная геометрия модели выглядит так, как показано на рисунке 2.3. Многослойная структура создается автоматически после нажатия кнопки  в  и предоставляет все необходимые граничные условия для решения задачи.

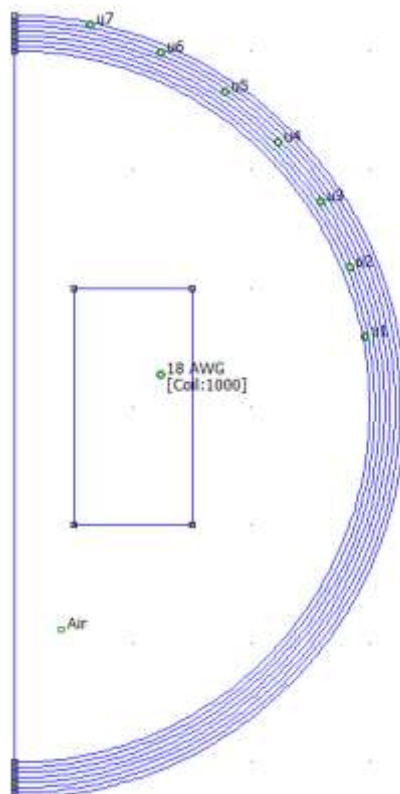





Рисунок 2.3 - Законченная модель катушки, готовая к анализу

### 1.9 Создание сетки и запуск FEA


Теперь **сохраните файл** и нажмите кнопку на панели инструментов с желтой сеткой: изображение . Это действие создает треугольную сетку (разбивает пространство моделирования на отдельные элементы (треугольники)). Если размер сетки кажется слишком мелким или слишком грубым, вы можете выбрать метки блоков или сегменты линий и настроить размер сетки, определенный в свойствах каждого объекта. После того, как сетка будет сгенерирована, нажмите на изображение кнопки «Повернуть кривошип» , чтобы проанализировать вашу модель.

Появится информация о статусе обработки. Если индикаторы прогресса не движутся, вероятно, следует отменить расчет. Это может произойти, если были указаны недостаточные граничные условия. Для этой конкретной задачи расчеты должны быть завершены в течение секунды.

### 1.10 Анализ результатов

Нажмите на изображение значка очки , чтобы просмотреть результаты анализа. Появится окно постпроцессора. Окно постпроцессора позволит вам извлечь из решения множество различных видов информации.

### 1.11 Значения в точке

Как и в препроцессоре, окно постпроцессора имеет набор различных режимов редактирования: «Точка», «Контур» и «Область». Выбор режима определяется кнопками панели инструментов режима, то есть изображением , где первая кнопка соответствует режиму «Точка», вторая - режиму «Контур», а третья - режиму «Область». По умолчанию, когда программа впервые установлена, постпроцессор запускается в точечном режиме. При

нажатии на любую точку левой кнопкой мыши отображаются различные свойства поля, связанные с этой точкой, в плавающем окне вывода FEMM. Как и при рисовании точек в препроцессоре, местоположение точки можно точно указать, нажав кнопку <TAB> и введя координаты нужной точки в появившемся диалоговом окне. Например, если точка (0,0) указана во всплывающем диалоговом окне, то результирующие свойства, отображаемые в окне вывода, будут выглядеть, как показано на рисунке 2.4.

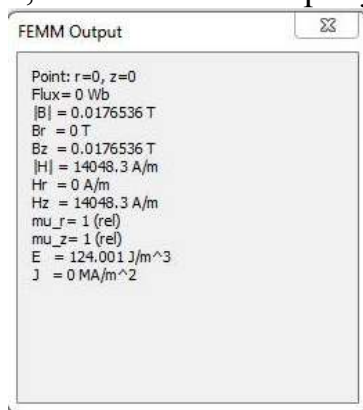



Рисунок 2.4 - Отображение значений поля в точке (0,0)

### 1.12 Свойства катушки

В FEMM легко определить индуктивность и сопротивление катушки. Нажмите кнопку изображения  (свойства цепи), чтобы отобразить рассчитанные параметры соленоида. В данном примере, диалоговое окно результатов отображено на рисунке 2.5.

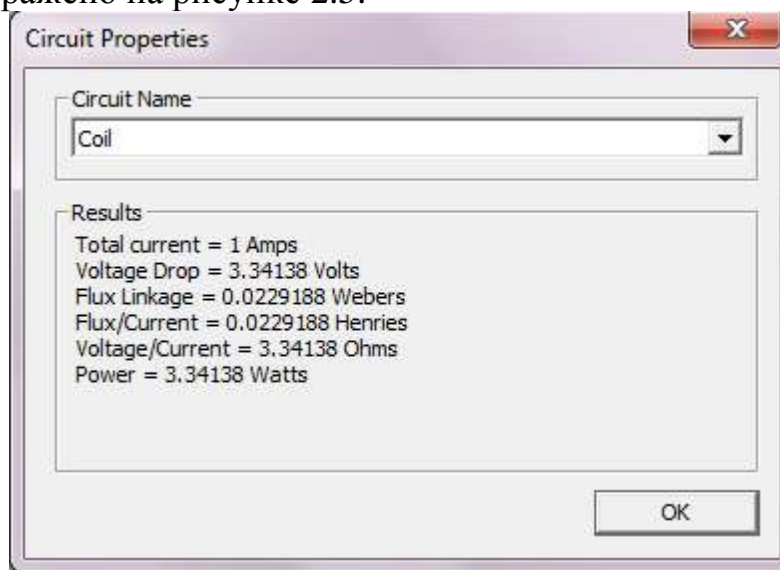



Рисунок 2.5 - Диалоговое окно рассчитанных свойств цепи

Поскольку задача является линейной и существует только один ток, результат «Flux/Current» («Поток/ток») можно однозначно интерпретировать как индуктивность катушки (т.е. 22,9 мГн). Сопротивление катушки является результатом «Voltage/Current» («Напряжение/ток») (т.е. 3,34 Ом).

### 1.13 Построение значений поля вдоль контура

FEMM также может отображать значения поля вдоль заданного пользователем контура (линии).


Здесь мы построим график значений вектора магнитной индукции (плотности магнитного потока) вдоль центральной линии катушки.

Переключитесь в режим контура, нажав кнопку на панели инструментов . Теперь вы можете провести контур, вдоль которого будет строиться поток. Есть три способа добавить точки к контуру:

1. Щелчок левой кнопкой мыши добавляет ближайший узел ввода к контуру;

2. Нажатие правой кнопки мыши добавляет текущее положение указателя мыши к контуру;

3. Клавиша <ТАВ> отображает диалоговое окно ввода точки, которое позволяет вводить координаты точки, добавляемой к контуру.

Здесь можно использовать метод 1. Щелкните левой кнопкой мыши возле узловых точек в точках (0,4), (0,0) и (0, -4), добавляя точки в указанном выше порядке. Затем нажмите кнопку графика на панели инструментов изображения . Нажмите **OK**, появится диалоговое окно X-Y с графиком значений поля. По умолчанию выбрана магнитная индукция (величина плотности магнитного потока) (смотри рисунок 2.6). При желании из выпадающего списка в этом диалоговом окне можно выбрать различные типы графиков.

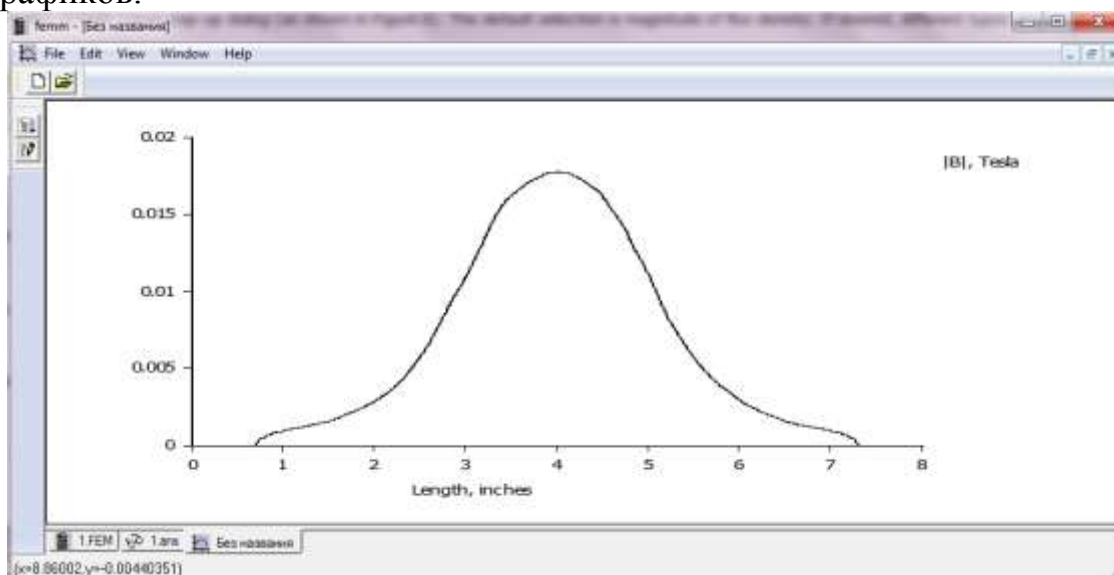


Рисунок 2.6 - График плотности потока вдоль оси катушки

## 1.14 График силовых линий магнитной индукции

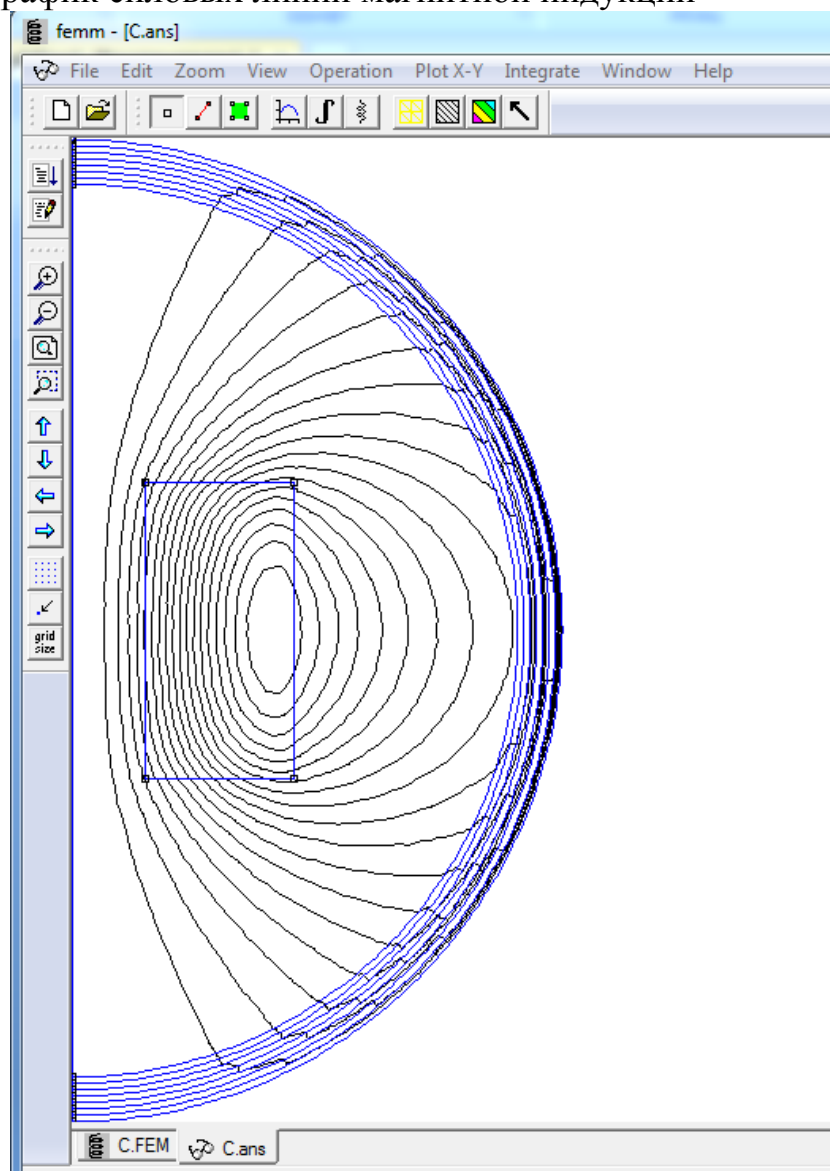



Рисунок 2.7 – Визуализация поля в виде силовых линий

По умолчанию при первой установке программы отображается только черно-белый график силовых линий магнитной индукции. Значения модуля магнитной индукции можно визуализировать с помощью цвета (каждому численному значению поля в данной точке сопоставить свой цвет). Для этого нажмите на изображение кнопки панели инструментов  (цвета радуги). Когда появится диалоговое окно, выберите переключатель  Show Density Plot и примите другие значения по умолчанию. Нажмите на . Полученный вид решения будет выглядеть так, как показано на рисунке 2.8.

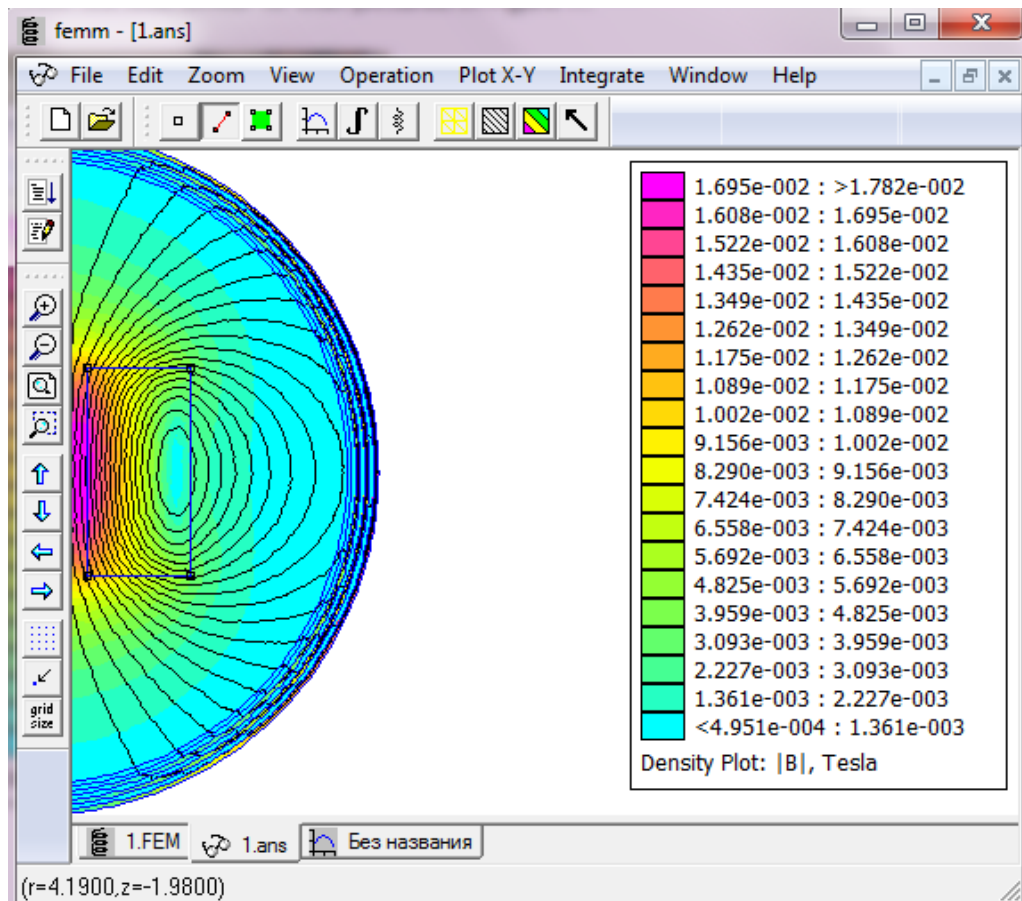


Рисунок 2.8- График плотности цветового потока раствора

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в FEMM.
2. Создайте аналогичный проект с теми же параметрами, но внутри соленоида поместите цилиндр из трансформаторной стали.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### **Визуализация и определение параметров поля соленоида с сердечником в FEMM**

В данном разделе будет подробно описан пошаговый алгоритм работы в программной среде FEMM на примере задачи моделирования магнитного поля соленоида и определения параметров производимого им магнитного поля.

#### ***1 Создание файла и задание начальных условий***

1.1 Запускаем программу. Создаём новый файл:

*File > new*

1.2 Открывается окно выбора задачи. Выбираем «Magnetic problem» для исследования параметров магнитного поля.

1.3 Выберем тип задачи. Она может быть планарной или аксиальной. В первом случае все объекты располагаются в плоскости экрана и продолжаются на некоторое расстояние перпендикулярно этой плоскости. Во втором – являются телами вращения относительно оси Y, проходящей через 0. В данном случае выбираем аксиальный тип задачи. Единица измерения – миллиметры. Частоту примем равной 100000 герц (100 кГц – стандартная частота работы большинства современных DC/DC преобразователей [3]).

*Problem > Problem Type > Axisymmetric*

*Length Units > Millimeters*

*Frequency (Hz) > 100000*

#### ***2 Построение геометрии модели***

2.1 На панели инструментов выберем инструмент «точка». В левом нижнем углу экрана указаны координаты курсора. При нажатии левой кнопки мыши на рабочем пространстве будет поставлена точка. Правой кнопкой выбирается точка, находящаяся ближе других к курсору. Нажатием Esc выделение отменяется. При нажатии кнопки Tab открывается окно редактирования параметров выбранной точки, либо окно создания новой точки (если ни одна точка не выбрана). Нажатием Delete можно удалить выбранную точку. Стрелками можно передвигаться по рабочему полю.

2.2 Создадим границу сечения соленоида. Для создания точки нажмём кнопку «Tab». Откроется окно, в котором необходимо задать её положение.



Изначально указаны координаты курсора в момент нажатия кнопки. Координата «Z» обозначает положение точки вдоль оси вращения. Координата «R» - расстояние между точкой и осью вращения. Создадим точки с координатами:


$$R = 5, Z = 15$$

$$R = 5, Z = 5$$

$$R = 7, Z = 15$$

$$R = 7, Z = 5$$

Для более удобного просмотра созданных точек рекомендуется сместить рабочую область, воспользовавшись кнопками масштабирования и перемещения на панели инструментов слева рабочего окна.

Выберем на верхней панели инструмент «линия» . Для соединения двух точек следует нажать левой кнопкой мыши на каждую из них. С помощью инструмента «линия» соединим четыре точки в прямоугольник.

Возможные проблемы [4]:

*А) Поставленная точка не видна.*

Причина: пользователь поставил точку за пределами рабочего поля.


Решение: стрелками переместить рабочую область к координатам точки. Выделив точку правой кнопкой мыши, можно переместить точку нажатием кнопки «Tab» или удалить её, нажав «Delete».

*Б) При постановке новой точки удаляется одна из созданных ранее.*

Причина: пользователь нажал «Tab», не сняв выделение с одной из точек. В таком случае программа не создаёт новую точку, а переносит выделенную по заданным координатам.

Решение: снять выделение со всех точек на рабочем поле. Это можно сделать повторным нажатием правой кнопки мыши, либо кнопкой «Esc».

2.3 Зададим границу рабочей области. Программа FEMM проводит расчёт по методу конечных элементов, поэтому для корректного функционирования необходимо создать границы рабочей области.

Для создания границы нажмём кнопку  на верхней панели инструментов. Откроется рабочее окно, в котором можно указать число слоёв (большее число слоёв соответствует большей точности расчёта магнитного поля), радиус рабочей области, а также координаты её центра и тип границы.

В открывшемся окне зададим параметры согласно рисунку 3.1.

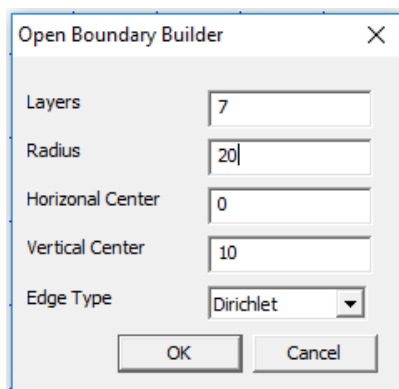


Рисунок 3.1 - Окно настройки рабочей области

2.4 Зададим параметры используемых электрических контуров. Для симуляции электромагнитных явлений создадим в программе электрический контур (в дальнейшем к нему можно будет отнести элементы, состоящие из проводящего материала). Программа будет считать, что по таким фрагментам идёт ток в соответствии с указанными настройками и рассчитывать соответствующее магнитное поле. Для настройки электрических контуров вызовем соответствующее окно, выбрав в верхнем меню:

*Properties > Circuits*


Появится диалоговое окно «Property definition». Нажмём кнопку «Add property» (добавить свойство). В появившемся окне можно задать имя контура, а также протекающий по нему ток в амперах. Направление тока можно указать, меняя знак тока (положительный или отрицательный). При положительном токе его направление будет «от наблюдателя», а при отрицательном – «к наблюдателю». Зададим силу тока в 2 ампера.

*Circuit Current, Amps > 2*

2.5 Выберем используемые для моделирования материалы. При моделировании соленоида нам потребуется воздух и медный провод. Добавим используемые материалы из библиотеки. Перейдём в библиотеку материалов:

*Properties > Materials Library*

Откроется окно выбора материала. Переместим в правую часть материал «air» (воздух). Из папки Copper AWG Magnet Wire (медный провод, диаметр которого указан в американской системе) выберем AWG26, соответствующий диаметру 0,4 мм.

2.6 Присвоим используемые материалы соленоиду, а также пространству вокруг него. При помощи инструмента . Поставим точку

внутри прямоугольника, а другую – за его пределами. Выбрав точку правой кнопкой мыши, нажмём «пробел» для перехода к редактированию свойств точки. После нажатия клавиши откроется диалоговое окно «Properties for selected block».

В графе «Block type» выберем используемый материал. Для точки вне прямоугольника это будет воздух («Air»). Таким образом, всё пространство кроме прямоугольной области имеет физические свойства воздуха.

Выбрав точку в прямоугольнике, выберем в графе «Block type» материал: 26AWG. Это означает, что прямоугольник станет телом вращения относительно оси Z (то есть тороидом), и будет состоять из медных проводников, диаметром 0,4 мм. В графе «In circuit» зададим принадлежность к созданному ранее контуру «New circuit», по которому протекает ток в 2 ампера.


Параметр «number of turns» обозначает число витков, образующих катушку. Зададим значение 100.


В результате этого шага получаем кольцо из медных проводников (электромагнитную катушку – соленоид), состоящую из 100 витков медного провода диаметром 0,4мм, по которой протекает ток в 2 ампера.

Сохраним полученный результат, выбрав в верхнем меню:


*File > save as*


### ***3 Расчёт физической модели соленоида***


Программа FEMM способна рассчитать плотность и направление магнитного поля [5]. Для этого необходимо составить физическую модель рабочей области нажатием кнопки  на верхней панели инструментов. После этого программа проведёт расчёт физики и сможет приступить к моделированию магнитных полей.

После готовности физической модели (рабочее поле покрывается жёлтыми многоугольниками) можно запустить анализ магнитных полей кнопкой  на верхней панели инструментов. Расчёт может занимать значительное время в зависимости от заданной точности и сложности расчёта.

### ***4 Настройка параметров отображения скалярных величин***

После завершения анализа можно перейти к просмотру результатов. Для этого на верхней панели инструментов выберем . Открывается раздел программы, предназначенный для просмотра результатов. Смоделированный соленоид изображён в виде прямоугольника с силовыми линиями, показывающими распределение магнитного поля.

В режиме просмотра верхняя панель одержит другой набор инструментов. Кнопки  открывают окна, отвечающие за режим просмотра. Первая из них позволяет настроить отображение силовых линий, вторая – распределения плотности магнитного поля, а третья – отображение параметров в векторной форме.

Для более наглядного представления магнитного поля можно перейти в настройки отображения, нажав кнопку . Откроется диалоговое окно, содержащее параметры отображения (рис. 3.2).

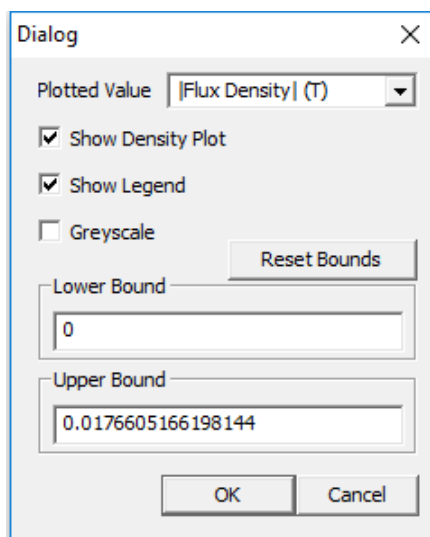


Рисунок 3.2 – Окно настройки отображения модели

В графе «Plotted Value» выбирается физическая величина, распределение которой будет представлено графически. Это может быть:

*I Flux Density I* – Плотность магнитного поля (Тл);

*I Re (Flux Density) I* – Реальная составляющая плотности магнитного поля (Тл);

*I Im (Flux Density) I* – Мнимая составляющая плотности магнитного поля (Тл);

*I Field Intensity I* – Напряжённость магнитного поля (А/м);

*I Re (Field Intensity)* – Реальная составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*I Im (Field Intensity)* – Мнимая составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*I Current Density I* – Плотность тока (А/мм<sup>2</sup>);

*I Re (Current Density) I* – Реальная составляющая плотности тока (А/мм<sup>2</sup>);

*I Im (Current Density) I* – Мнимая составляющая плотности тока (А/мм<sup>2</sup>).

Установив галочку напротив пункта «Show density plot», можно получить цветовую картину в гамме от голубого до пурпурного, а при выборе пункта «Greyscale» - от белого до чёрного. Параметры «Lower Bound» и «Upper bound» определяют соответствие размерности выбранной величины

и цветового диапазона. На рисунке 3.3 представлено изображение магнитного поля соленоида после выполнения описанных операций.

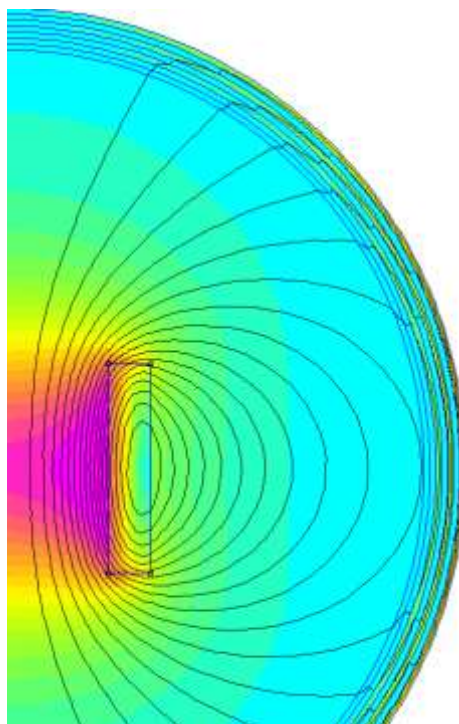





Рисунок 3.3 – Цветовая модель магнитного поля соленоида

При этом в правой части экрана показывается обозначение интервала плотности магнитного поля, в котором оно обозначается каждым конкретным цветом.

### ***5 Настройка параметров отображения векторных величин***

Для демонстрации возможностей отображения магнитного поля в векторном виде проведём настройку параметров.

Во всплывающем по нажатию кнопки  в окне «Contour plot options» отключим отображение силовых линий. Для этого снимем галочку с пункта «real component of A». Нажав кнопку , отметим пункт «Greyscale». В меню  для отображения магнитного поля катушки в векторной форме и масштабирования вектора удобным образом выберем:

*Vector Plot Type > B\_re*  
*Scaling\_factor > 3*

Отображение магнитного поля в окне программы после произведённых настроек представлено на рисунке 3.4.

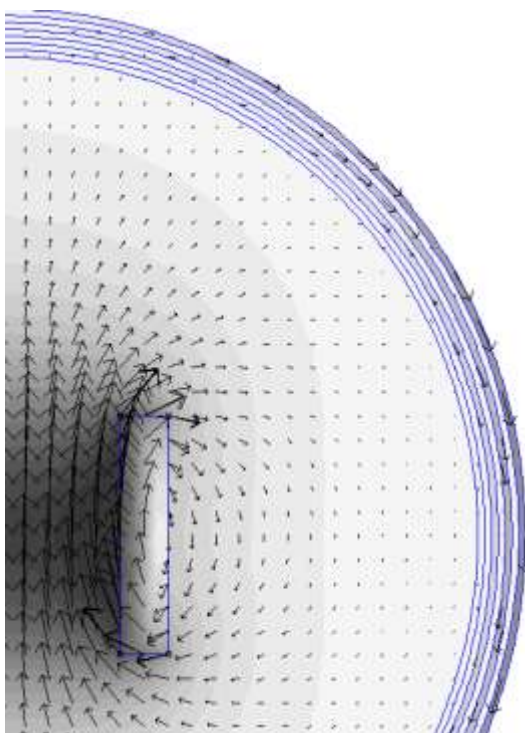


Рисунок 3.4 – отображение магнитного поля соленоида в векторной форме

Стрелками указано направление вектора магнитного поля, а цветом заливки и размерами стрелок – его интенсивность.

Подобным образом в векторной форме можно отобразить:

$B_{re}$  – Реальную составляющую индукции (Тл);

$B_{im}$  – Мнимую составляющую индукции (Тл);

$H_{re}$  – Реальную составляющую напряжённости поля (А/м);


$H_{im}$  – Мнимую составляющую напряжённости поля (А/м);

$B_{re}$  &  $B_{im}$  – полную индукцию (Тл);


$H_{re}$  &  $H_{im}$  – полную напряжённость поля (А/м).

Для отображения интересующего параметра следует выбрать его в окне «Vector Plot Options».

### ***6 Определение параметров физических величин в заданной точке***

Кнопки  используются для вывода информации о параметрах магнитного поля и материала. Первая из них – инструмент «точка». Выбрав его, можно измерить параметры магнитного поля в определённой точке. Для этого следует включить опцию:

*View > output window*

После этого появится диалоговое окно, в котором отображаются параметры магнитного поля в заданной точке. Для выбора точки измерения следует воспользоваться инструментом «точка»  на верхней панели.

После этого достаточно нажать левой кнопкой мыши на участке рабочей области или нажать клавишу «Tab» для точного выбора координат.

В качестве примера определим модуль индукции магнитного поля в центре полученной катушки. Для этого выберем инструмент «точка» и нажмём клавишу «Tab», затем введём координаты центра катушки:

$$r = 0;$$
$$z = 10.$$

После этого в окне FEMM Output будут выведены параметры, представленные на рисунке 3.5.

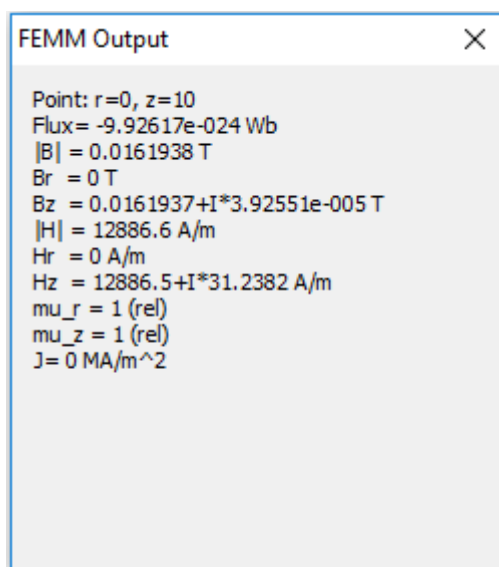


Рисунок 3.5 – Значения физических величин в центре смоделированного соленоида

В данном окне отображаются:

*Point* – координаты точки измерения (измеряются в выбранных изначально единицах);

*Flux* – магнитный поток (Вб);

*I B I* – модуль магнитной индукции (Тл);

*Br* – радиальная составляющая индукции (перпендикулярно оси вращения) (Тл);

*Bz* – вертикальная составляющая индукции (параллельно оси вращения) (Тл);

*I H I* – модуль напряжённости магнитного поля (А/м);

*Hr* – радиальная составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*Hz* – вертикальная составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*Mu\_r* – относительная магнитная проницаемость материала перпендикулярно оси вращения;




*Mu\_z* – относительная магнитная проницаемость параллельно оси вращения;

*J* – плотность тока (А/мм<sup>2</sup>).

При измерении AWG проводника добавляется так же ещё один параметр:

*Winding Fill* – Процент заполнения пространства медью. Он обозначает, какая часть сечения приходится на металл, а какая – на свободное место между проводниками, которое неизбежно будет возникать из-за круглого сечения каждого отдельного провода.

### **7 Определение профиля распределения физических величин вдоль произвольно построенной линии**

Следующий инструмент измерения – «линия» , используемый в паре с инструментами «график»  и «интеграл» . Первый из них позволяют оценить динамику изменения физической величины при изменении координаты. Для измерения сначала необходимо задать ломаную линию, которая станет осью «х» графика. Для её построения необходимо выбрать ряд точек. Есть три способа сделать это:

1. Нажатием левой кнопки мыши выбирается ближайшая к курсору геометрическая точка (например, контур обмотки созданного ранее соленоида);
2. Нажатием правой кнопки мыши точка ставится непосредственно под курсором;
3. Нажатием клавиши «Tab» можно задать точные координаты точки.

Для отмены созданной ранее точки следует нажать клавишу «Delete». Для отмены всей последовательности точек можно воспользоваться кнопкой «Esc».

После задания линии для построения профиля следует воспользоваться инструментом «график». Во всплывающем окне выбрать измеряемую величину из списка, а также количество точек в одном графике и стиль отображения. Возможно измерение следующих величин:

*Potential* – Магнитный поток (Вб);

*I B I* – Магнитная индукция (Тл);

*B, n* – Нормальная составляющая индукции (Тл);

*B, t* – Тангенциальная составляющая индукции (Тл);

*I H I* – Напряжённость магнитного поля (А/м);

*H, n* – Нормальная составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*H, t* – Тангенциальная составляющая напряжённости магнитного поля (А/м);

*J\_eddy* – Плотность вихревых токов (токов Фуко) (А/мм<sup>2</sup>);

*J\_s + J\_eddy* – Полная плотность тока, включающая в себя собственные токи контуров и вихревые токи в них (А/мм<sup>2</sup>).

В качестве примера изучим динамику изменения магнитной индукции от центра построенного соленоида к краю рабочей области. Для этого выберем инструмент «линия» и создадим две точки. Нажатием «Tab» зададим им координаты:

$A (r = 0; z = 10);$

$B (r = 20; z = 10).$



После этого рабочую область пересечёт красная линия, вдоль которой будет отображаться изменение выбранной физической величины. Нажав кнопку вывода графика, выберем во всплывающем меню *IBI (Magnitude of flux density)*. После подтверждения будет построен график, на котором по оси *x* указано расстояние вдоль линии от центра к краю соленоида, а по оси *y* – интенсивность магнитной индукции. На рисунке 3.6 представлен полученный график.

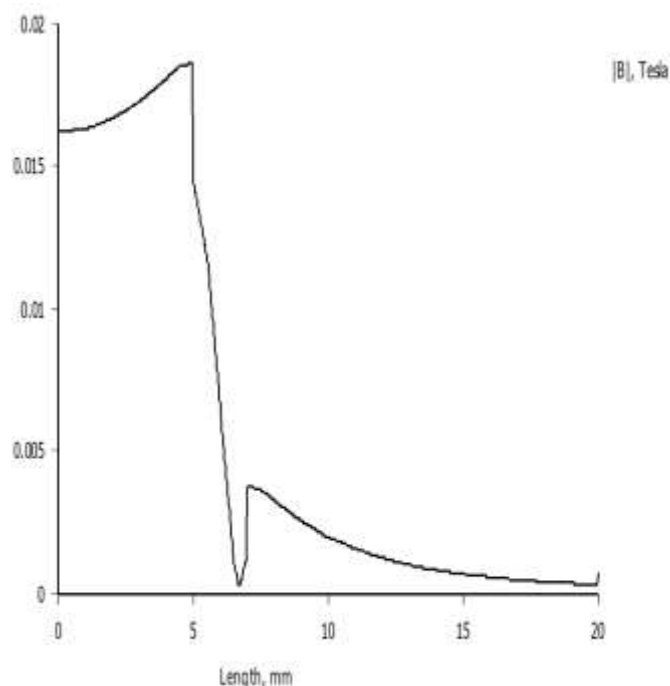


Рисунок 3.6 – Изменение интенсивности магнитного поля от центра соленоида к его краю

### ***8 Нахождение интеграла физических величин по плоскости***

После создания линии можно воспользоваться инструментом «интеграл». С помощью этого инструмента в сочетании с инструментом «линия» можно измерить следующие параметры:

*V.n* – Магнитный поток (Вб) и среднее значение индукции (Тл);

*H.t* – Магнитодвижущая сила (А\*Виток) и среднее значение напряжённости магнитного поля (А/м);



*Contour length* – Длина линии (м) и площадь поверхности тела вращения этой линии (м<sup>2</sup>);

*Force from Stress Tensor* – Тензор напряжений (Н);

*Torque from Stress Tensor* – Момент вращения, вызванный тензором напряжений (Н\*м<sup>2</sup>);

$(B.n)^2$  – Квадрат магнитного потока (Вб<sup>2</sup>) и среднего значения индукции (Тл<sup>2</sup>).

## 9 Нахождение интеграла физических величин по объёму

Следующая пара инструментов исследования – площадь  и интеграл . Для выбора площади следует выбрать левой кнопкой мыши ограниченный линиями контур. В данном случае таким контуром может быть сечение обмотки соленоида или воздух вокруг него. После выбора область окрасится зелёным. Для выбора всей рабочей области следует сделать двойной щелчок на любом объекте в её пределах. Для отмены выбора достаточно выбрать объект повторно или нажать «Esc».

После выбора площади можно выбрать инструмент «интеграл». В программе доступны следующие физические величины для измерения:

*Magnetic field energy* – Энергия магнитного поля (Дж);

*Hysteresis, Laminated eddy, or Proximity effect* – Потери на гистерезис, вихревые токи, эффект близости (Вт);

*Resistive losses* – Потери на сопротивление (Вт);

*Block cross-section area* – Площадь сечения ( $\text{м}^2$ );

*Total losses* – Полные потери (Вт);

*Total current* – Суммарный ток (А);

*Integral of B over block* – Суммарная индукция (Тл\*м);

*Block volume* – Объём тела вращения ( $\text{м}^3$ );

*Lorentz force ( $J \times B$ )* – Сила Лоренца, Н;

*Lorentz torque ( $r \times J \times B$ )* – Момент вращения, вызванный силой Лоренца (только для планарного типа задач) ( $\text{Н}^*\text{м}$ );

*Magnetic field coenergy* – Способность магнитного поля накапливать энергию (Дж);

*Force via Weighted Stress Tensor* – Сила тяжести, действующая на объект (Н);

*Torque via Weighted Stress Tensor* – Момент вращения, действующий на объект из-за силы тяжести ( $\text{Н}^*\text{м}$ );

*$R^2$  (i.e. Moment of Inertia / Density)* – Момент инерции/плотность ( $\text{м}^5$ );

*Total loss density* – Плотность рассеяния энергии ( $\text{Вт}^*\text{м}^3$ ).

В качестве примера проведём измерение суммарных потерь энергии в созданной обмотке, определим процентное соотношение между потерями на сопротивление и высокочастотными потерями (гистерезис, вихревые токи, эффект близости).


Проведя измерения, получаем следующие величины:

Потери на сопротивление: 0.92651 Ватт (17,6%)

Высокочастотные потери: 4.3455 Ватт (82,4%)

Как правило, на частотах выше 50 кГц доминирующую роль играют высокочастотные потери что подтверждается результатами моделирования.

## 10 Оценка параметров созданных электрических контуров

Для использования этой функции следует на верхней панели инструментов выбрать . В открывшемся меню будут доступны созданные ранее электрические контуры, а также следующие их параметры:

*Total current* – Ток в контуре (А);

*Voltage Drop* – Падение напряжения на контуре (В);

*Flux Linkage* – Магнитный поток через контур (Вб);

*Flux/Current* – Индуктивность (Тл);

*Voltage/Current* – Сопротивление (Ом);

*Real Power* – Активная мощность (Вт);

*Reactive Power* – Реактивная мощность (ВА);

*Apparent Power* – Полная мощность (ВА).

### Задания

Для усвоения и закрепления материала предлагается выполнить 9 задач, каждая из которых имеет 15 вариантов. При выполнении заданий следует использовать рисунок 7 и таблицу 1.

*Задание 1.* Выбрать аксиальный тип задачи, частота равна 100000 Гц, единица измерения – сантиметры. Радиус рабочей области 12, её центр расположен в точке с координатами [0; 0].

Построить электромагнитную катушку согласно чертежу на рисунке 7. Исходные данные для построения выбрать из таблицы 1 согласно номеру варианта задания, учитывая, что  $r$  и  $z$  с индексами А, В, С и D – координаты соответствующих точек,  $I$  – сила тока в исследуемом контуре,  $N$  – число витков соленоида. В качестве материала обмотки использовать медный провод AWG26 (его диаметр равен 0,4 мм).

*Задание 2.* Определить модуль магнитной индукции в точке [0,0].

*Задание 3.* Определить радиальную составляющую вектора индукции в точке [4,4].

*Задание 4.* Определить магнитный поток, проходящий через окно катушки. Измерение проводить между точками [0, 0] и [ $r_A$ , 0].

*Задание 5.* Определить суммарную энергию генерируемого магнитного поля

*Задание 6.* Построить график изменения модуля индукции между точками [0.1, -10] и [0.1, 10].

*Задание 7.* Построить график изменения модуля индукции между точками [0, 0] и [12, 0].

*Задание 8.* Построить картину распределения напряжённости магнитного поля. Отображать в гамме от голубого до пурпурного, нижняя граница интервала 0, верхнюю границу определить автоматически. Отображение силовых линий оставить по умолчанию.

*Задание 9.* Определить падение напряжения на созданной катушке.

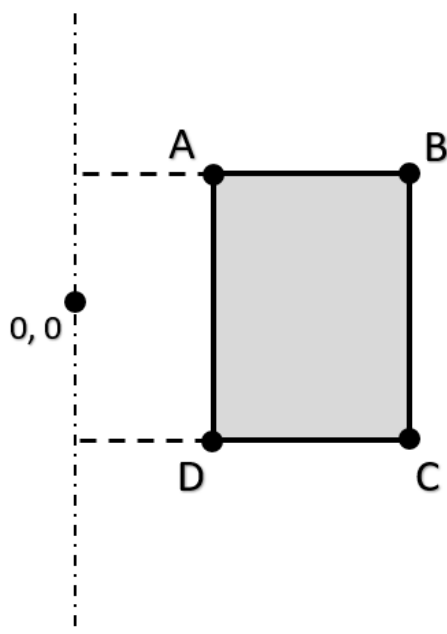


Рисунок 3.7 – Чертёж сечения обмотки соленоида с указанием точек для построения

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения заданий

Номер 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 № 4

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

**Постановка задачи.** В одной плоскости с бесконечно длинным прямым проводом, по которому течет ток  $I = 50$  А, расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной  $l = 65$  см параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Каков магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку?

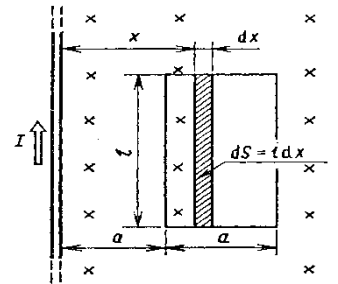


Рис. 24.2

#### Решение. 1 способ - аналитическое решение

Магнитный поток  $\Phi$  через поверхность площадью  $S$  определяется выражением

$$\phi = \int_S B_n dS$$

В нашем случае вектор магнитной индукции  $B$  перпендикулярен плоскости рамки. Поэтому для всех точек рамки  $B_n = B$ . Магнитная индукция  $B$ , создаваемая бесконечно длинным прямым проводником с током, определяется формулой

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x},$$

где  $x$  — расстояние от провода до точки, в которой определяется  $B$ .

Для вычисления магнитного потока заметим, что так как  $B$  зависит от  $x$  и элементарный поток  $\Phi$  будет также зависеть от  $x$ , то

$$d\Phi = B(x) dS.$$

Разобьем площадь рамки на узкие элементарные площадки длиной  $l$ , шириной  $dx$  и площадью  $dS = l dx$  (рис. 24.2). В пределах этой площадки магнитную индукцию можно считать постоянной, так как все части площадки равноудалены (на расстояние  $x$ ) от провода. С учетом сделанных замечаний элементарный магнитный поток можно записать в виде

$$d\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx$$

Проинтегрировав полученное выражение в пределах от  $x_1 = a$  до  $x_2 = 2a$ , найдем

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_a^{2a} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln x \Big|_a^{2a}.$$

Подставив пределы, получим

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln 2.$$

Убедимся в том, что правая часть полученного равенства дает единицу магнитного потока (Вб):  $[\mu_0] [I] [l] = \text{Гн/м} \cdot \text{А} \cdot \text{м} = 1 \text{ Вб}$ . Произведя вычисления по формуле (1), найдем  $\Phi = 4,5 \text{ мкВб}$ .

## Решение. 2 способ – численное решение на основе метода конечных элементов посредством программы FEMM

Запустите FEMM, выбрав соответствующий пункт, размещенный в разделе меню «Пуск». После запуска программы выберите **File**, затем **New** в главном меню (рис. 4.1). Появится диалоговое окно, позволяющее выбрать тип создаваемой проблемы. Выберите **Magnetics Problem** из выпадающего списка для текущего примера. Пустая проблема появится.

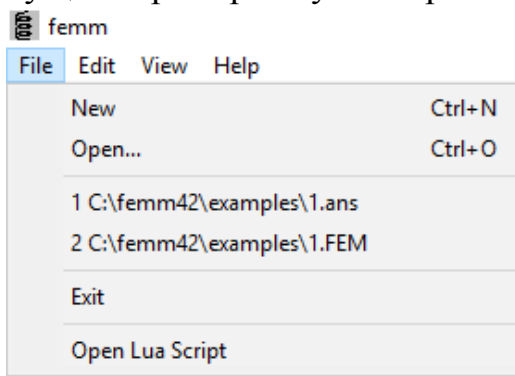


Рисунок 4.1 - Создание нового файла

Выберем тип задачи: расчёт магнитного поля (рис.4.2).

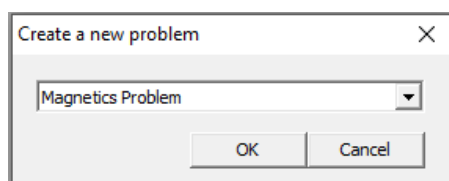


Рисунок 4.2 - Выбор типа задачи

Выбрав вкладку «проблема», зададим основные параметры исследуемой задачи, как показано на рисунке 4.3.

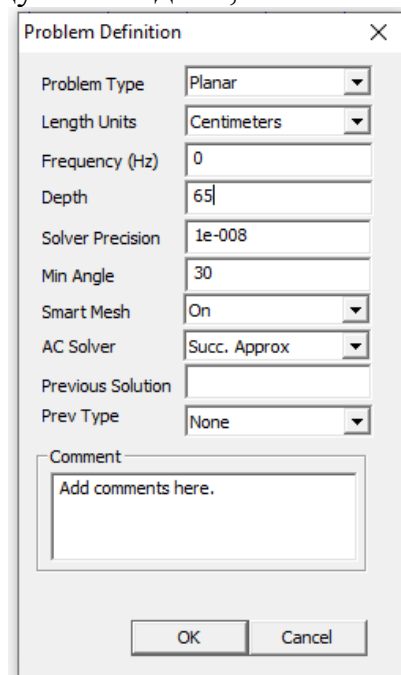



Рисунок 4.3 - Основные параметры задачи

Теперь создадим на рабочем поле проводник с током. Для этого поставим две точки, выбрав инструмент «точка» (  ) и нажав «пробел» на рабочем поле., либо, нажав клавишу <ТАВ> и задав точки, как показано на рисунке 4.4

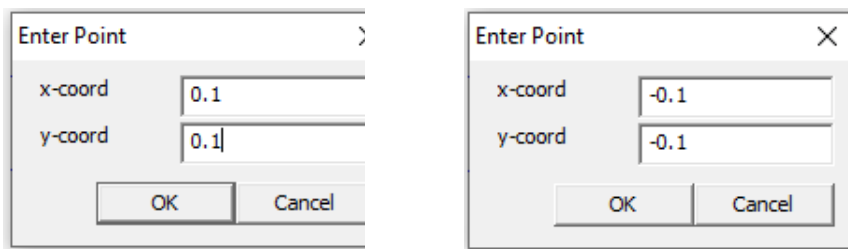



Рисунок 4.4 - Значения точек

Далее выберем инструмент «дуга» (  ) и, выбрав обе точки, введём во всплывающем окне показанные на рисунке 4.5 ниже параметры.

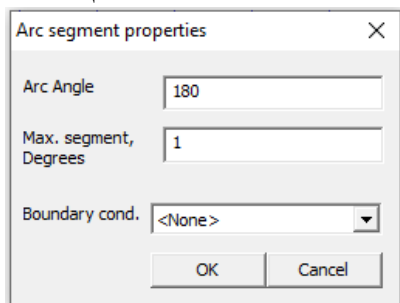


Рисунок 4.5 - Параметры для дуги

В результате получим срез проводника с током (рис. 4.6).

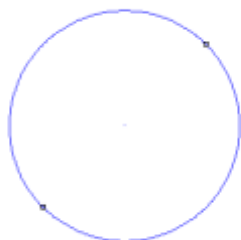


Рисунок 4.6 - Срез проводника с током

Далее откроем меню настройки электрических контуров, нажав **Properties**, а затем **Circuits**, как показано на рисунке 4.7.

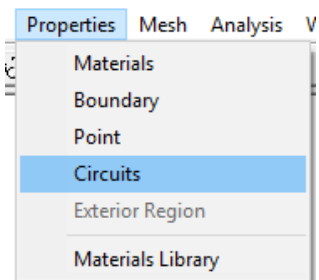


Рисунок 4.7 - Меню настройки электрических контуров

В открывшемся окне нажмём **Add Property**, как показано на рисунке 4.8.

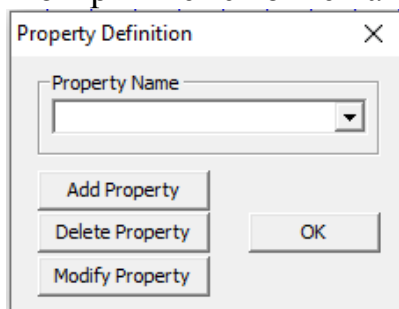


Рисунок 4.8 - Добавление электрического контура

Зададим силу тока 50 Ампер (рисунок 4.9).

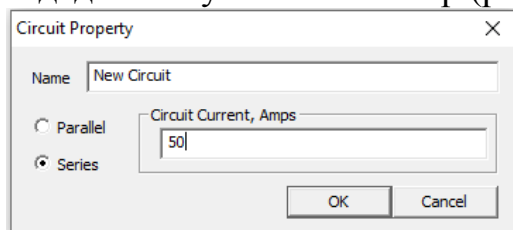


Рисунок 4.9 - Добавление контура с силой тока 50А

Далее откроем меню настройки материалов, нажав **Properties**, а затем **Materials Library**. Алгоритм показан ниже, на рисунке 4.10.

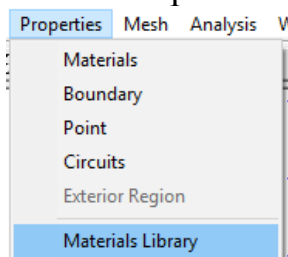




Рисунок 4.10 - Открытие библиотеки материалов

В открывшемся меню перенесём в правую часть материалы  Air и  12 AWG, как показано на рисунке 4.11.

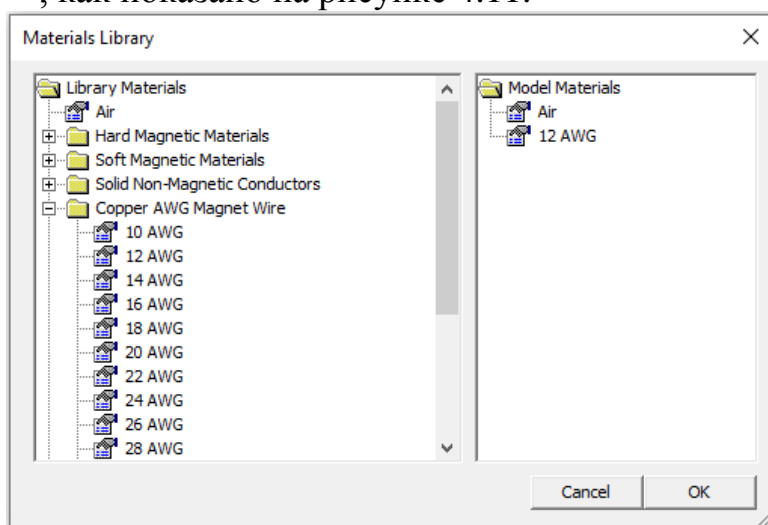


Рисунок 4.11 - Добавление материалов




Теперь используем инструмент создания материала (  ). Создадим с его помощью точку в круге, построенном ранее, а другую – за его пределами. Результат изображен на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 - Построение точек

Выбрав точку правой кнопкой мыши и нажав «пробел» зададим параметры. В **Block type** нужно выбрать **12 AWG**, поставить галочку в строчке  **Let Triangle choose Mesh Size**. Для точки внутри круга (рисунок 4.14).

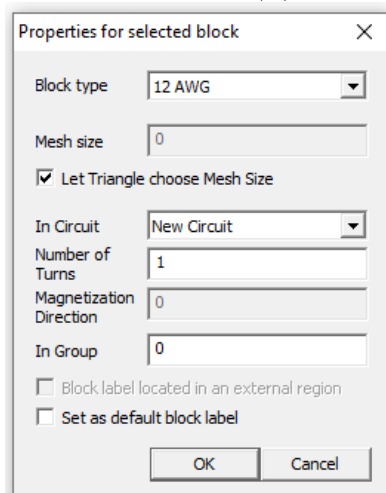


Рисунок 4.14 - Свойства для внутренней точки

Для точки снаружи контура выбрать в **Block type** пункт **Air** и поставить галочку в  **Let Triangle choose Mesh Size**, как показано на рисунке 4.15.

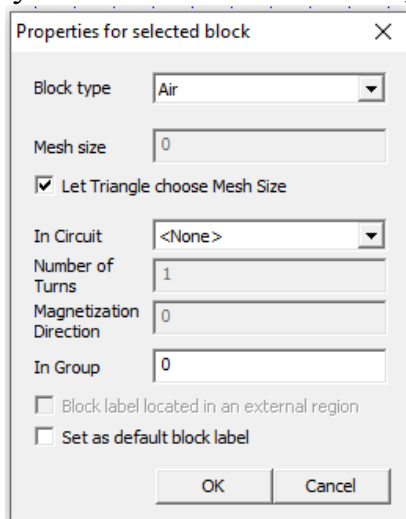



Рисунок 4.15- Свойства для наружной точки

Теперь модель готова к построению. Необходимо сохранить файл.

Используя  кнопку на панели инструментов, создадим границы рабочей области. Зададим параметры, как на рисунке 4.16.

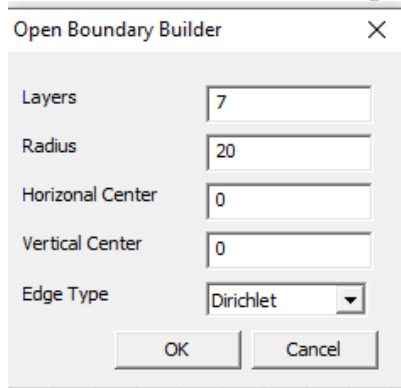


Рисунок 4.16 - Свойства границ

Подтвердив параметры, увидим, что рабочая область построена вокруг проводника (рис. 4.17).

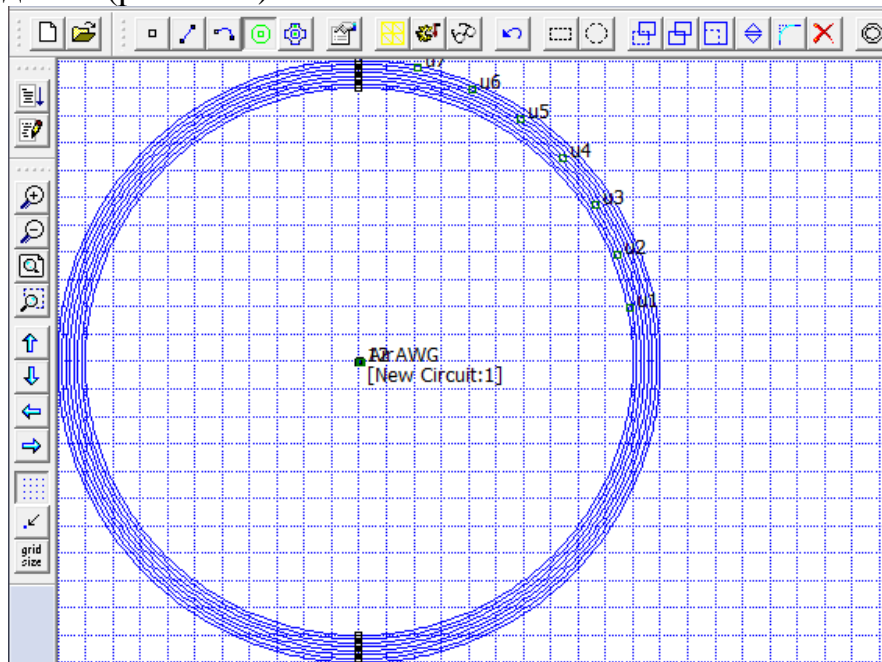


Рисунок 4.17 - Рабочая область вокруг проводника

Используя  кнопку, создадим модель, как показано на рисунке 4.18.

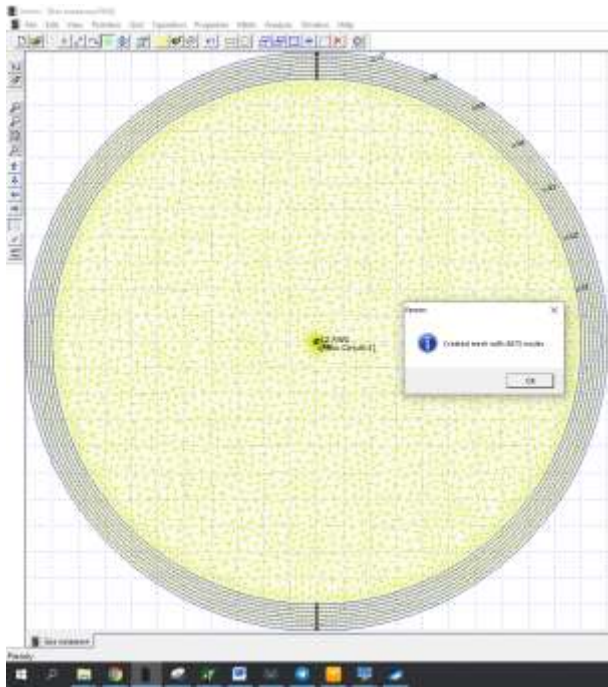




Рисунок 4.18 - Генерация сетки

С помощью  кнопки выполним расчёт модели. Нажав  кнопку, перейдём к просмотру результатов (рисунок 4.19).

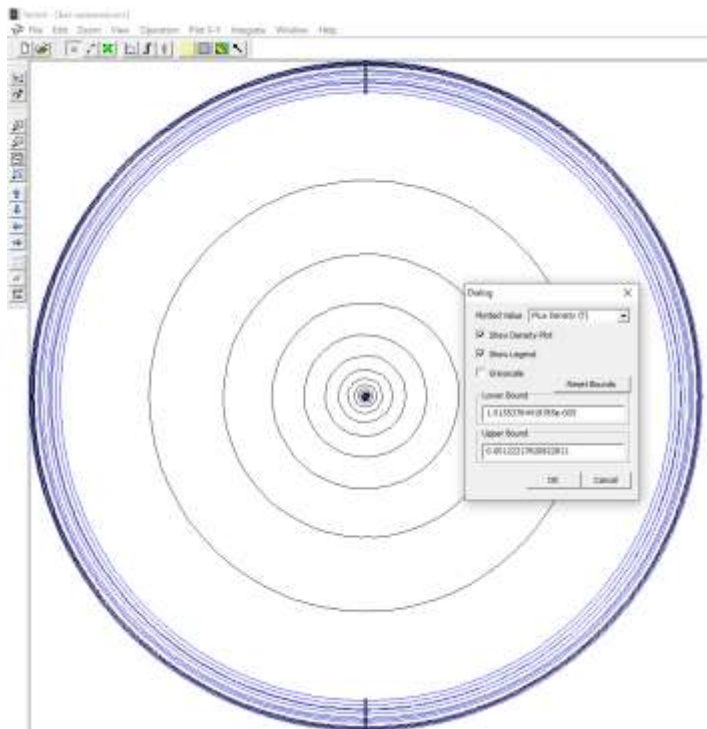


Рисунок 4.19 - Расчет модели

Нажав  кнопку, получим вид, который представлен на рисунке 4.20.

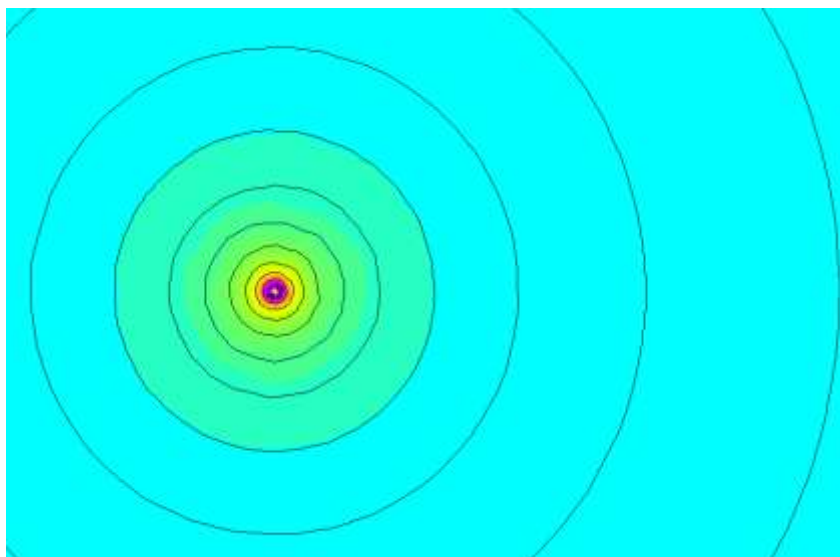



Рисунок 4.20 - Градиент результатов

Используя инструмент «линия» , с помощью кнопки «пробел» создадим точки с координатами, представленными на рисунке 4.21.

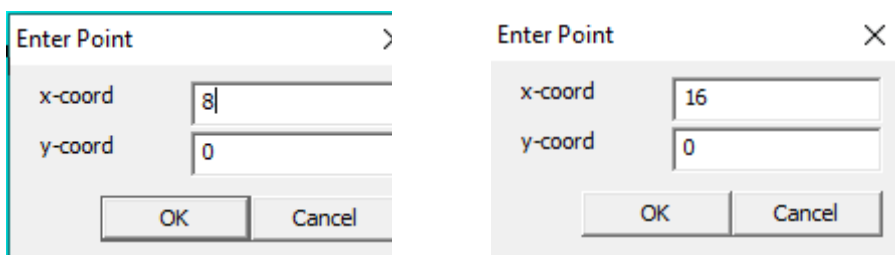



Рисунок 4.21 - Параметры новых точек

Таким образом, построили линию между точками с указанными координатами. Нужно щёлкнуть на значок интеграла . Выберем рассчитываемую величину, как на рисунке 4.22.

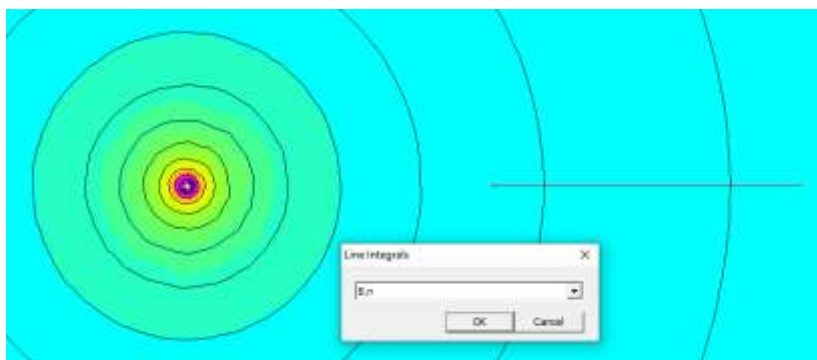


Рисунок 4.22 - Тип линий интеграла

Подтвердив выбор, получим результат вычисления, представленный на рисунке 4.23.

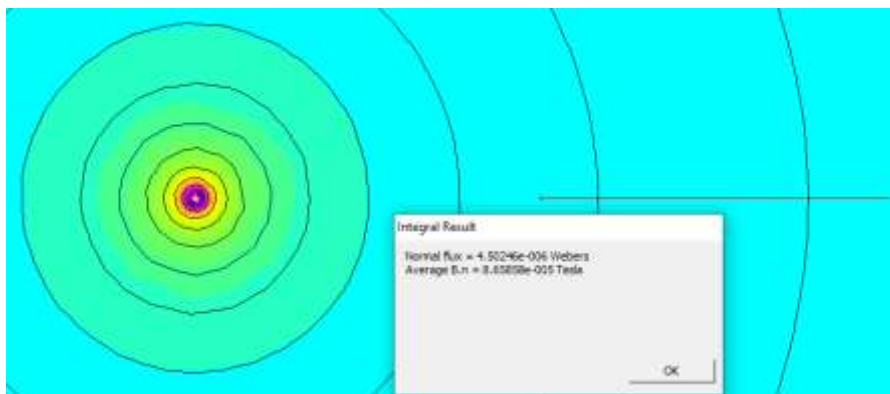


Рисунок 4.23 - Результат интегрирования

Как видим, программа так же показала магнитный поток, равный 4,5 мкВб.

### Задания

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

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### Расчет и визуализация поля температур трубы дымохода квадратного сечения в FEMM

Расчитать тепловой поток через стенки 20-тиметровой кирпичной трубы дымохода квадратного сечения, сторона внешней грани которой равна 4 м, а внутренней – 2 м (как показано ниже на рисунке 5.1). Для расчетов вследствие симметрии достаточно смоделировать только  $\frac{1}{4}$  сечения трубы, а потом полученные аддитивные величины умножить на 4.

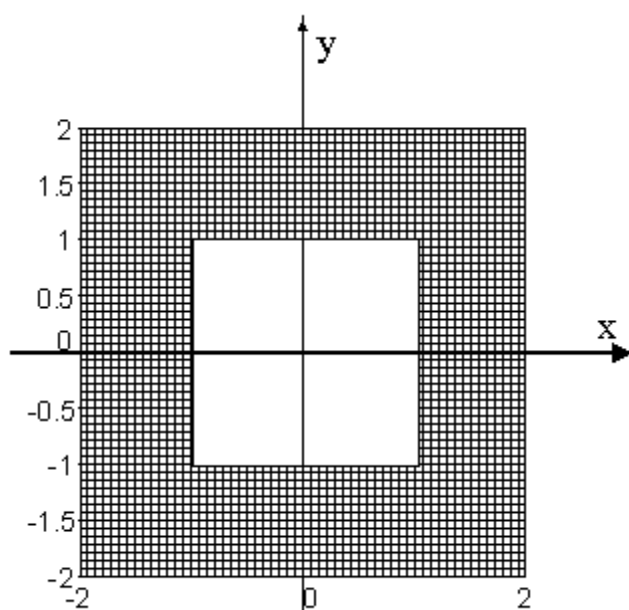




Рисунок 5.1 - Сечение дымохода

#### 3.1 Задание геометрии

Запустите FEMM, выбрав пункт в разделе меню «Пуск». После запуска программы выберите **File**, затем **New** в главном меню. Появится диалоговое окно, позволяющее выбрать тип создаваемой проблемы. Выберите **Heat Flow Problem** из выпадающего списка для текущего примера. Выберите «узлы» на панели инструментов (это самая крайняя кнопка слева: ) и разместите 6 узлов для угла поля (например, (0,1), (1,1), (1,0), (2,0), (2,2) и (0,2)). Узлы можно размещать, перемещая указатель мыши в нужное место и нажимая левую кнопку мыши, или нажимая клавишу <TAB> и вручную вводя координаты точки через всплывающее диалоговое окно.

Выберите «линии» на панели инструментов (вторая кнопка слева с синей линией: ). Чтобы выбрать узел в качестве конечной точки линии, щелкните левой кнопкой мыши рядом с каждой требуемой конечной точкой. Соедините точки, как показано на рисунке 5.2.

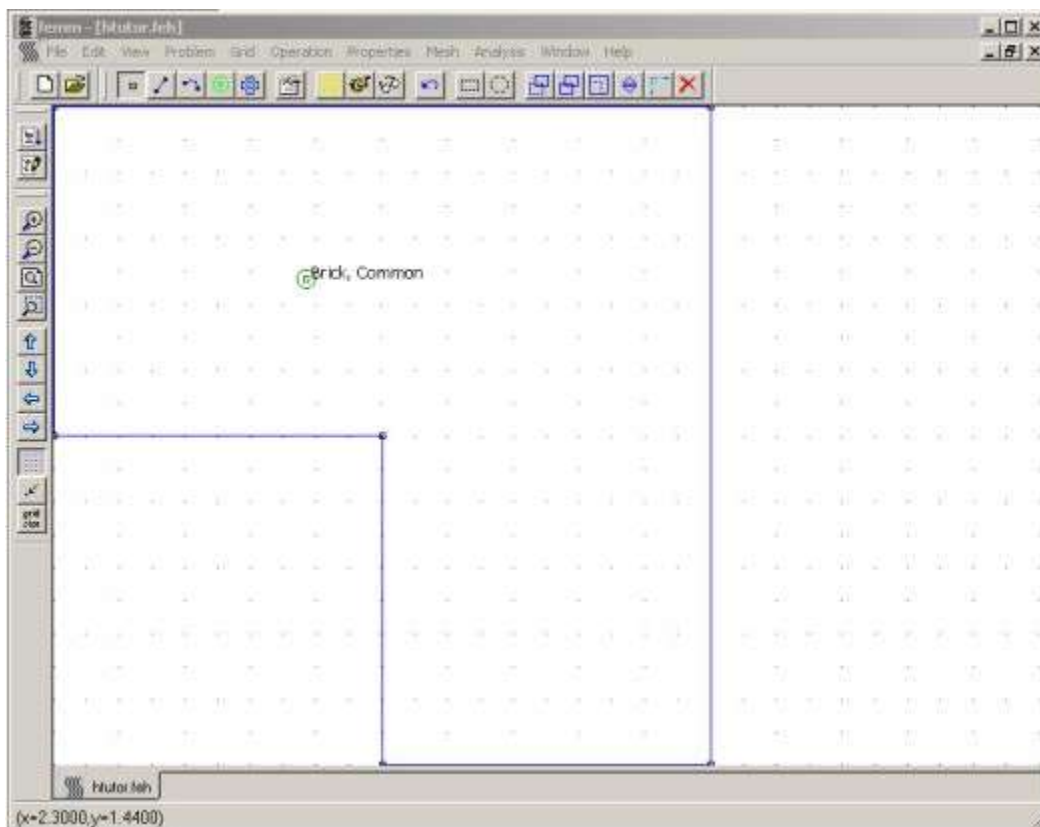






Рисунок 5.2 – Завершенная модель в препроцессоре

### 3.2 Задание материалов модели

Выберите **Properties**, а затем **Materials Library** в главном меню. Появится диалоговое окно, которое позволит вам перетаскивать материалы из библиотеки в вашу модель. В библиотеке откройте папку  **Nonmetallic Solids**, а затем папку  **Bricks** (кирпичи) внутри нее. Перетащите элемент  **Brick, Common** из библиотеки в модель. Нажмите кнопку **OK**, чтобы выйти из библиотеки материалов.

### 3.3 Задание материалов для каждой замкнутой области модели


Теперь нажмите «Метки блока» (кнопка на панели инструментов с зелеными кружками: ) и поместите метку блока в середине области решения, между внутренним и внешним квадратами. Как и точки узлов,

метки блоков могут быть размещены либо щелчком левой кнопки мыши, либо в диалоговом окне <TAB>.

Щелкните правой кнопкой мыши узел метки блока для внешнего блока, чтобы узел стал красным, обозначая, что он выбран. Нажмите пробел, чтобы «открыть» метку выбранного блока. Появится диалоговое окно, содержащее свойства, назначенные выбранной метке. Установите **Block type** на **Brick, Common**. Снимите флажок  **Let Triangle choose Mesh Size** и введите 0.05 для **Mesh size**. Параметр размера ячейки определяет ограничение на максимально возможный размер элементов, разрешенный в соответствующем разделе. Генератор сетки пытается заполнить область почти равносторонними треугольниками, у которых стороны примерно такой же длины, что и указанный параметр **Mesh size**. Когда установлен флажок  **Let Triangle choose Mesh Size**, генератор сетки выбирает размер элемента автоматически, что обычно приводит к несколько грубой сетке.

### 3.4 Задание граничных условий

Выберите **Properties**, а затем **Boundary** в строке меню, затем нажмите кнопку **Add Property**. Замените название **New Boundary** на **Inner Boundary**. Выберите **Convection** из списка **BC Type**. Для внутренней поверхности дымохода будем считать, что температура воздуха внутри дымохода составляет  $800$  К, а коэффициент теплопередачи -  $10$  Вт/м\*К. Введите эти значения в соответствующие активные поля редактирования. Нажмите **OK**. Вы только что определили граничное условие теплопередачи для внутренней поверхности дымохода. Повторите описанный выше процесс, но вместо этого назовите новое граничное условие **Outer Boundary** и примените коэффициент теплопередачи  $5$  Вт/м\*К и температуру  $300$  К.

Выберите  на панели инструментов, затем щелкните правой кнопкой мыши на каждом из двух сегментов, принадлежащих внутренней поверхности дымохода. Когда сегмент становится красным, вы выбрали его. Теперь нажмите пробел, и появится окно **Segment Property**. Из раскрывающегося





списка **Boundary** измените выбор с **<None>** на **Inner Boundary**. Повторите этот процесс для внешней границы, но установите тип границы **Outer Boundary**.

### 3.5 Установление характеристик задачи


Выберите **Problem** в строке меню. В появившемся диалоговом окне убедитесь, что тип проблемы **Planar**. Установите единицы измерения длины в **Meters** и установите для параметра **Depth** (глубина) значение 20м. Точность решателя, по умолчанию, равна  $10^{-8}$ . При желании в поле «Комментарий» можно добавить описательный комментарий.


### 3.6 Создание сетки и запуск конечно-элементного анализа

Теперь сохраните файл и нажмите кнопку на панели инструментов с желтой сеткой: . Это действие создает треугольную сетку для вашей задачи. Теперь нажмите кнопку , чтобы запустить алгоритм конечно-элементного анализа (решатель) для вашей модели.

Информация о состоянии обработки будет отображаться в диалоговом окне во время работы решателя. Если индикаторы выполнения не движутся, вероятно, следует отменить расчет. Для данной задачи вычисления должны быть выполнены менее чем за секунду (хотя время решения сильно зависит от скорости машины, выполняющей анализ). Когда вычисления завершены, окно состояния просто исчезает.

### 3.7 Визуализация результатов

Нажмите на значок , чтобы визуализировать поле температур (в К). Решение будет отображено, как показано на рисунке 5.3.

Для определения теплового потока, который подходит к внутренней поверхности трубы, нажмите кнопку , чтобы перевести постпроцессор в режим контура. В этом режиме определите контур, вдоль которого будет выполнено интегрирование теплового потока.

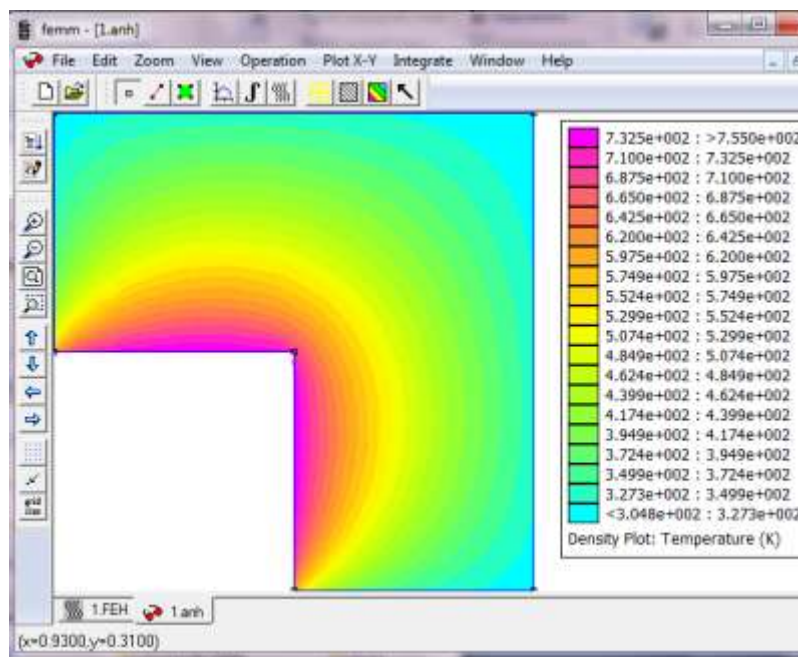



Рисунок 5.3 – Визуализация распределения поля температур, отображаемого в постпроцессоре


Создайте контур, который идет из центра дымохода. С помощью мыши или диалогового окна, вызываемого клавишей <ТАВ> постройте контур по узловым точкам (0,1.5), (1.5,1.5) и (1.5,0). Нажмите кнопку , чтобы оценить тепловой поток, распространяющийся по нормали к контуру, в появившемся диалоговом окне выберите **Heat Flux (F.n)** и нажмите **OK**. Затем появится результат интегрирования, который должен быть равен 14883,6 Вт, если задача была правильно построена. Чтобы получить результат для всего дымохода, полученное значение нужно умножить на четыре, что даст значение теплового потока внутри трубы 59534,4 Вт.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в FEMM.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: длина кирпичной трубы дымохода 10 м, сторона внешней грани квадратного профиля равна 2 м, а внутренней – 1 м.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### Визуализация электрического поля конденсатора из двух прямоугольных пластин с учетом краевых эффектов в FEMM

Запустите FEMM, 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

«Electrostatic problem» из списка предлагаемых проблем (рис. 6.1).

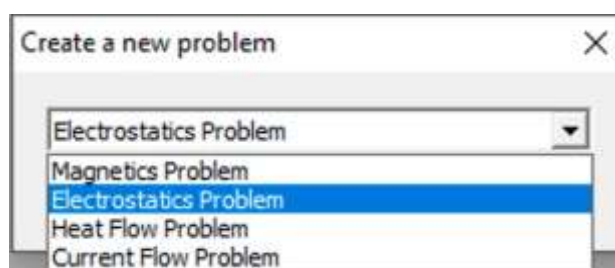


Рисунок 6.1 – Выбор типа задачи

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

Для начала выбрать тип проблемы (problem type), единицы измерения length units (в нашем случае, метры) и глубину (в нашем случае. 0,03), как показано на рисунке 6.2.

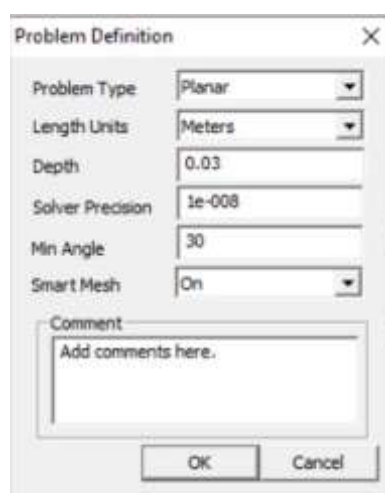



Рисунок 6.2 – Основные параметры задачи

Далее нажать на кнопку , после чего появится диалоговое окно

(рисунок 6.3), где задаётся шаг сетки, в нашем случае шаг имеет значения 0,01.

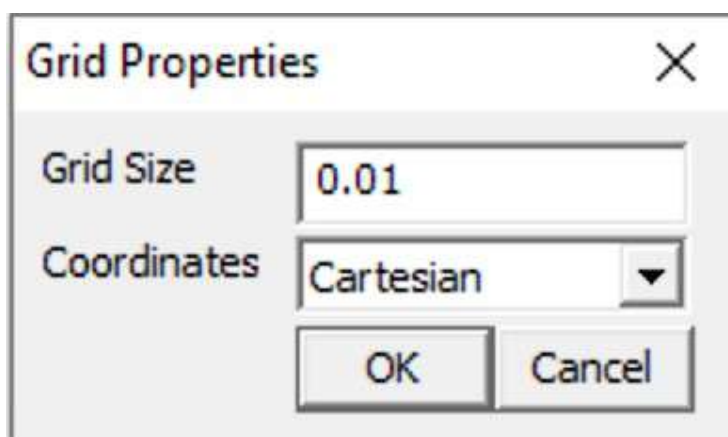



Рисунок 6.3 – Основные параметры задачи

После задания параметров переходим к созданию модели. Для этого поставим четыре точки, выбрав инструмент «Узел» (Operate on nodes)  и, нажав клавишу

«Tab», задать точкам координаты в рабочем поле, как показано на рисунке 6.4.

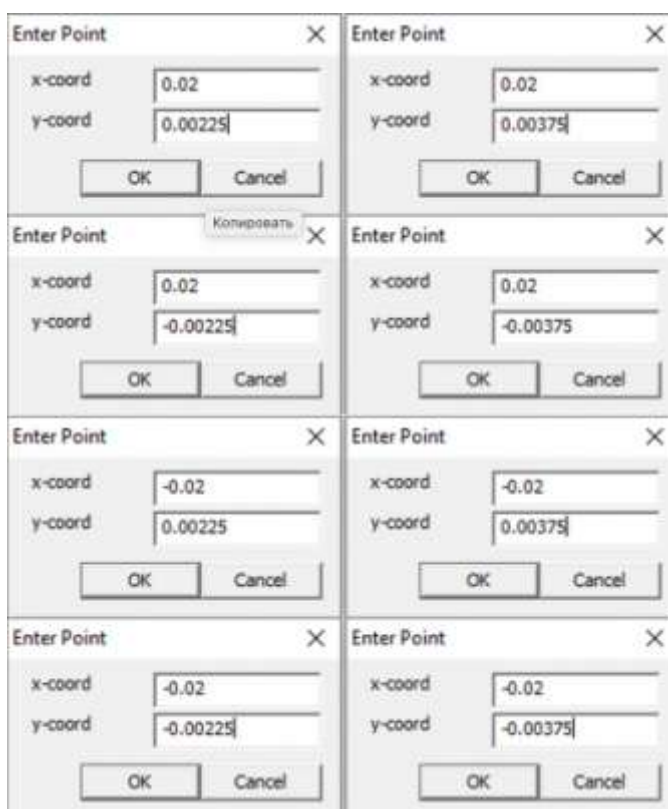



Рисунок 6.4 – Значения точек для пластин

Теперь необходимо создать границы рабочей области. Для этого воспользуемся кнопкой «Create IABC Open Boundary» , после чего появится диалоговое окно. Зададим в нем значения, как на рисунке 6.5.

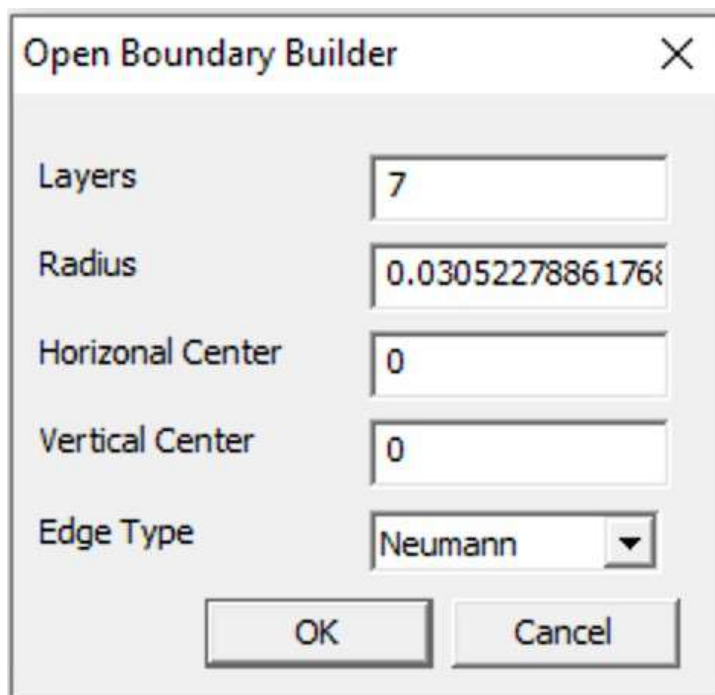



Рисунок 6.5 – Требуемые значения для рабочей зоны

Далее выберем инструмент «Ребро» (Operate on segments)  и, зажав клавишу «Ctrl», соединить первые 4 точки, «у» координаты которых больше 0, и вторые 4 точки, «у» координаты которых меньше 0, чтобы получились 2

прямоугольника. В итоге получается следующая картина (рис. 6.6).



Рисунок 6.6 – Работа с ребрами

После проведенных операций получаем модель двух пластин с током в рабочей зоне. Результат изображен на рисунке 6.7.

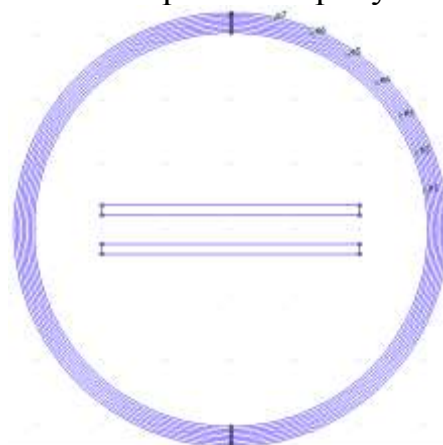


Рисунок 6.7 – Пластины с током и рабочая область вокруг них

Далее воспользуемся инструментом «Метка» (Operate on block labels)



Одну метку создадим внутри круга между пластин, нажав на левую кнопку мыши.

Две другие метки помещаем внутрь каждой пластины соответственно. Результат показан на рисунке 6.8.

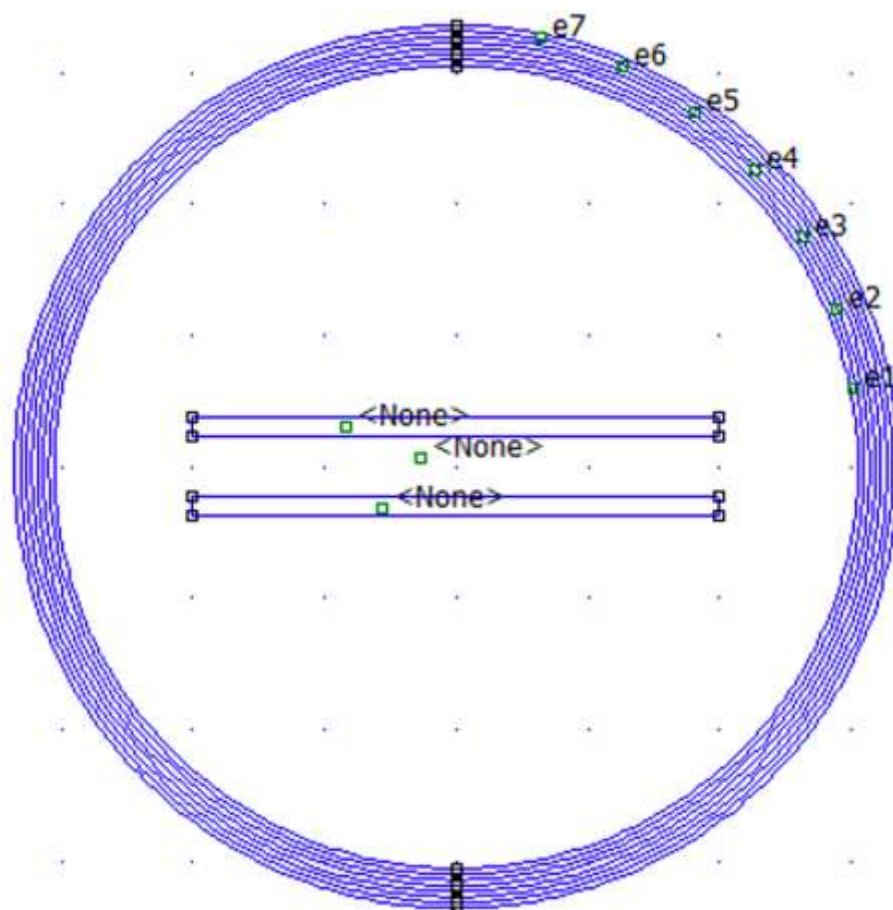


Рисунок 6.8 – Работа с метками

Следующим действием нужно задать граничные условия для пластин.

Для этого воспользуемся вкладкой **Properties**. В открывшейся вкладке выберем «Conductors» (рис. 6.9).

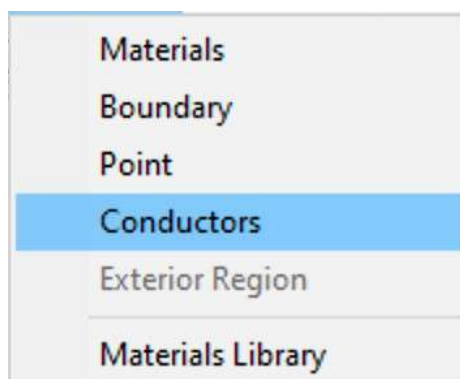


Рисунок 6.9 – Создание граничных условий

Выбрав данный пункт, появляется диалоговое окно, в котором выбирается тип граничных условий, а также его параметры (рис. 6.10).

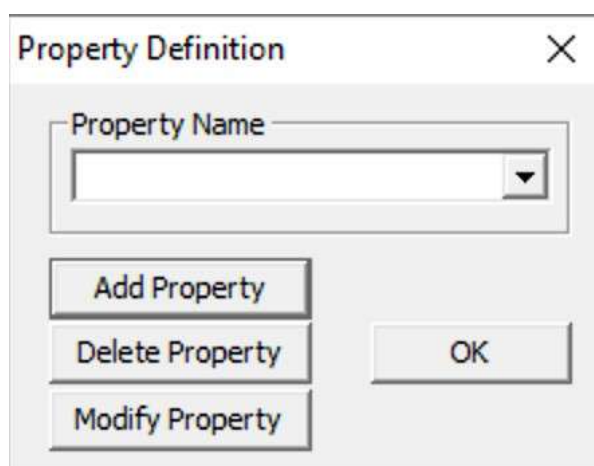


Рисунок 6.10 – Диалоговое окно conductors

В нашем случае требуется задать два условия 12V и 0V. Для решения данной задачи следует нажать на кнопку «add property» и во всплывшем окне задать имя и напряжение (рис. 6.11).

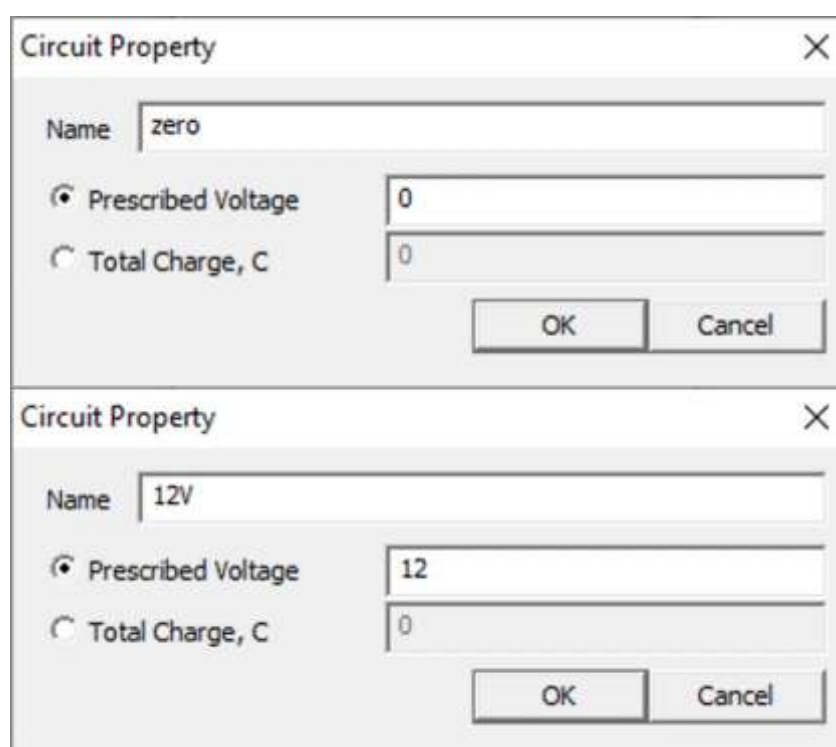


Рисунок 6.11 – Параметры граничных условий

Далее, для присвоения граничных условий пластинам необходимо выделить все четыре ребра одной и другой пластины и нажать клавишу «пробел», после чего на экране появится диалоговое окно с выпадающим списком, в котором нужно выбрать созданные ранее граничные условия (рис. 6.12).

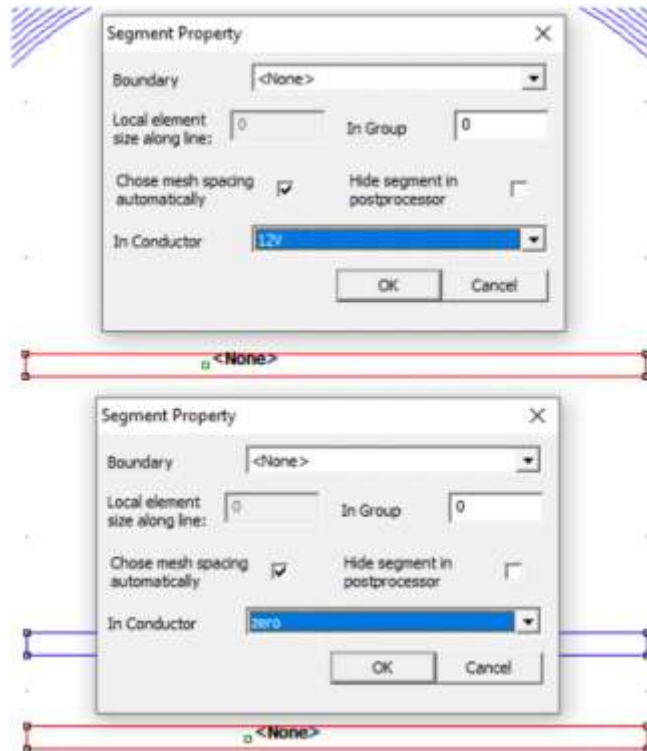


Рисунок 6.12 – Присвоение граничных условий

Для создания материалов во вкладке properties выбираем materials, после чего во всплывшем окне задаем свойства материала. Необходимо создать один материал: воздух, как показано на рисунке 6.13.

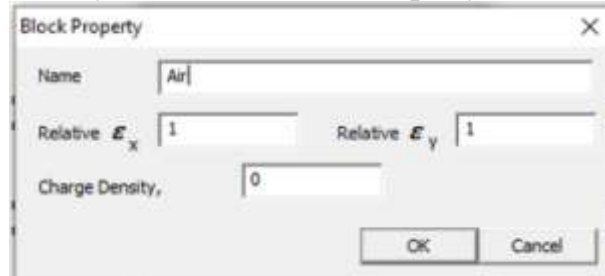
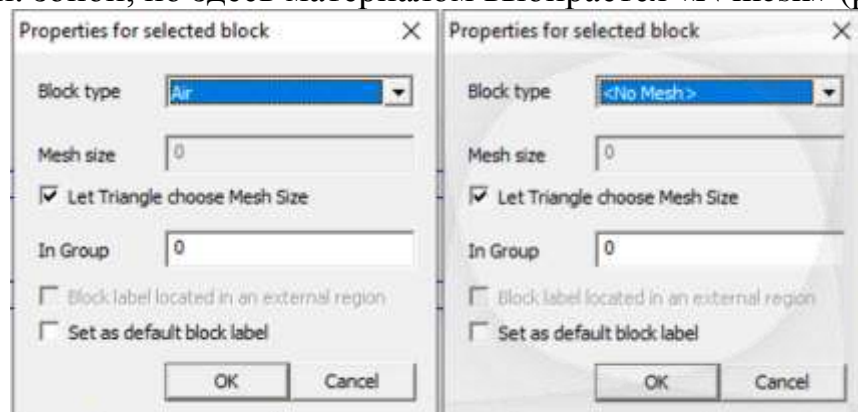


Рисунок 6.13 – Свойства материалов

Для того, чтобы присвоить материал для провода, необходимо правой кнопкой мыши выделить метку между пластин и нажать клавишу «пробел». Появится диалоговое окно с выпадающим списком, в котором нужно выбрать необходимый материал – air. Для пластин проделываем то же самое, что и с рабочей зоной, но здесь материалом выбирается «N mesh» (рис. 6.14).





### Рисунок 6.14 – Работа с материалами

На рисунке 6.15 показана готовая геометрия модели пластин под напряжением со всеми необходимыми характеристиками и параметрами.

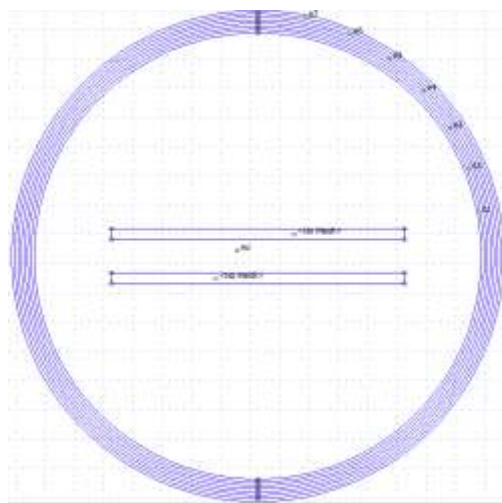



Рисунок 6.15 – Модель пластин в программной среде FEMM

Далее требуется сохранить созданную нами модель. Для этого перейдем во вкладку **File** и выберем «save as...». После сохранения перейдем к генерации сетки. Нажмем на кнопку «Run mesh generator» , где создается модель, как показано на рисунке 6.16.

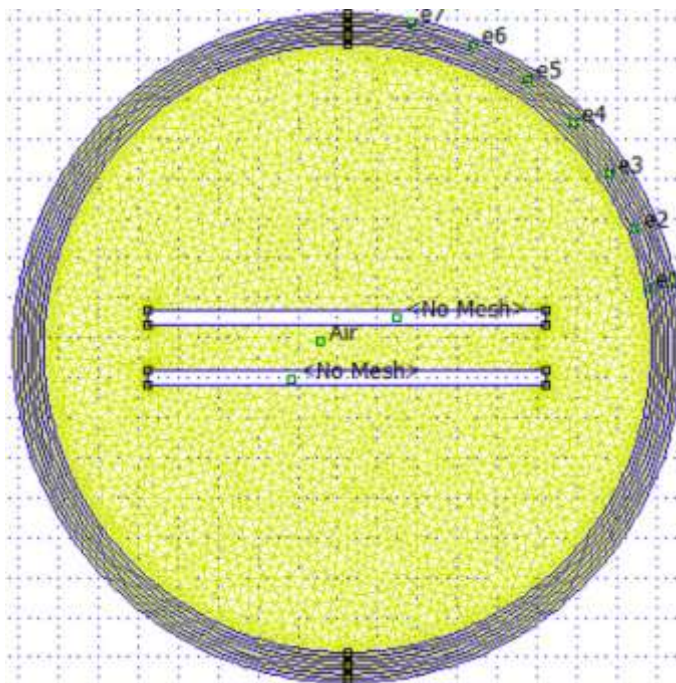




Рисунок 6.16 – Генерация сетки

После генерации сетки требуется запустить анализ нашей модели, для это нажмем на кнопку «Run analysis» . Чтобы увидеть результаты анализа нажмем на кнопку «View results»  и получим скалярное изображение

электрического поля вокруг пластин с током (рисунок 6.17). В результатах отображено напряжение в каждой части рабочей зоны.

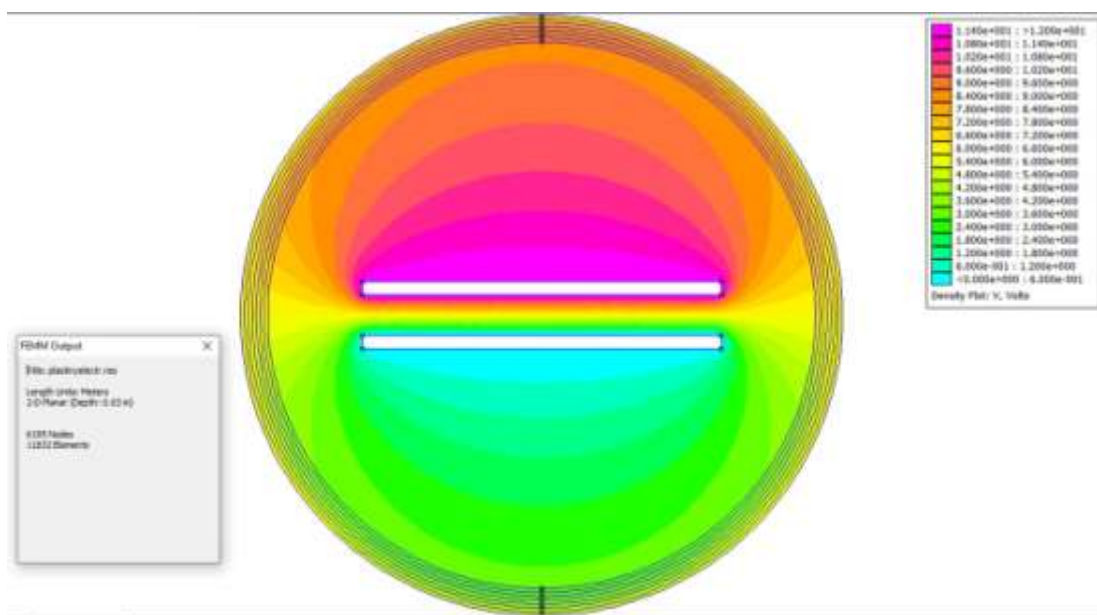



Рисунок 6.17 – Скалярный вид электрического поля пластин

Нам требуется отобразить напряженность поля, для этого нажмем на кнопку  и во всплывшем диалоговом окне выбрать «Field intensity  $|E|$ », как показано на рисунке 6.18.

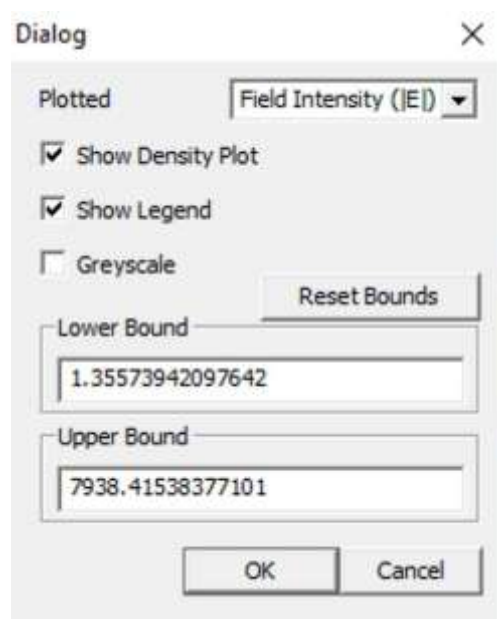


Рисунок 6.18 – Диалоговое окно изменения отображения поля

В результате получаем поле, изображенное на рисунке 6.19.

Значения напряженности по цветам отображены в правом верхнем углу.

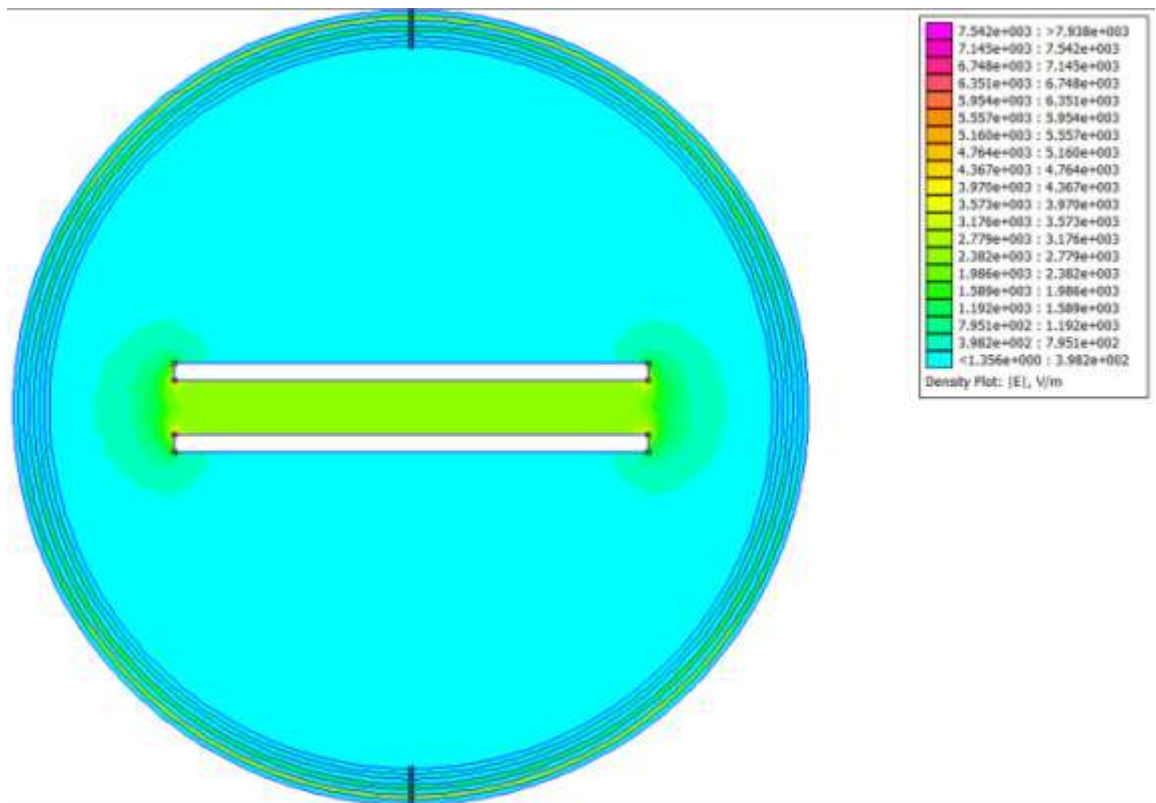


Рисунок 6.19– Результаты вычислений

Таким образом, мы получили точные расчеты и визуализацию потенциала и напряженности в программной среде FEMM.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в FEMM.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: длина обкладки конденсатора (глубина) 4 см, ширина (по  $x$ ) 5 см, высота (по  $y$ ) 1 мм, расстояние между обкладками 6 мм, на положительную пластину подается напряжение 5 В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### Расчет заряда системы двух проводящих сфер, находящихся под напряжением в FEMM

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. Рассчитать заряд верхней сферы.

Рассмотрим пример осесимметричной системы, для которой необходимо использовать специальное «открытое» граничное условие для имитации неограниченной области моделирования.

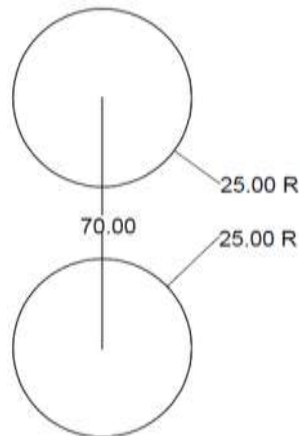




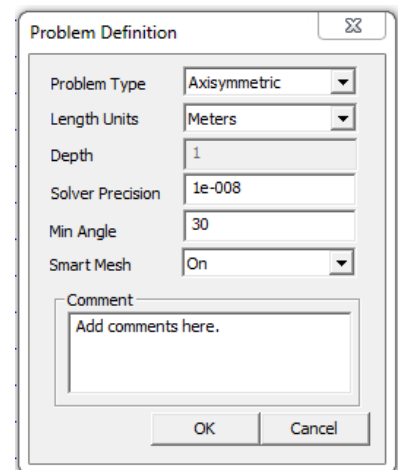
Рисунок 7.1 – Две проводящие сферы

Расположение сфер изображено на рисунке 7.1. Две сферы радиусом 25 м каждая расположены в воздухе одна над другой, расстояние между их центрами 70 м. На верхнюю сферу подан потенциал 100 В, а на нижнюю сферу подан потенциал -100 В.

Из соображений симметрии рационально моделировать только четверть вертикального сечения, проходящего через центры сфер. На горизонтальной линия симметрии между двумя сферами потенциал равен 0 В.

Сначала установите свойства **Problem** на осесимметричные **Axisymmetric** и единицы измерения – метры (Meters).

Измените «Размер сетки»  (панель инструментов слева) на 10, что означает, что шаг между двумя ближайшими друг к другу точками теперь равен 10 м, и выберите привязку к сетке, нажав на значок . Привязка к сетке позволяет точкам и меткам блоков размещаться точно на точках сетки с помощью щелчков левой кнопки мыши.




Для настройки Zoom выберите **View**, а затем **Keyboard** (задание размера области обзора с клавиатуры). В появившемся



диалоговом окне укажите координаты нижнего левого угла экрана как (0,0), и координаты верхнего правого угла - (150,150).

Поместите узлы в  $(r, z) = (0,0)$ ,  $(0,10)$  и  $(0,60)$ ,  $(0,150)$  и  $(150,0)$  (воспользуйтесь подсказкой строки состояния для считывания текущей позиции указателя мыши, которая находится в левом нижнем углу на сером фоне).

Соедините линии от  $(0,0)$  до  $(0,10)$  и от  $(0,60)$  до  $(0,150)$ . Эти линии расположены вдоль оси вращения модели. Также нарисуйте линию от  $(0,0)$  до  $(150,0)$  вдоль горизонтальной оси симметрии между двумя сферами.

Выберите изображение  кнопки панели инструментов дуги. Выберите точку  $(0,10)$  (нижняя точка), затем выберите точку  $(0,60)$  (верхняя точка). Когда появится диалоговое окно, введите  для **Arc Angle** и 1 для **Max. segment, Degrees**. В FEMM круги моделируются в виде многогранных многоугольников, а  задает наибольшую дугу в градусах, которую можно охватить любой стороной многоугольника. Ограничение в  $1^\circ$  представляет довольно точную дискретизацию. (Дуга будет нарисована в направлении против часовой стрелки, поэтому в данном случае важен порядок выбора точек при ее рисовании.) В результате нарисован полукруг, представляющий собой половину внешней стороны верхней проводящей сферы.

Теперь выберите точку  $(150,0)$ , за которой следует точка  $(0,150)$ , и введите  для **Arc Angle** и «1» для **Max. segment, Degrees**. Эта дуга будет внешней границей области моделирования.

Отмените выбор , переключитесь в режим «метка блока» (нажав на ) и поместите метку блока  <None> внутри замкнутой области между внешней поверхностью проводящей сферы и дугой, представляющей внешнюю границу.

Добавьте  Air к материалам модели, используя **Properties**, а затем **Materials** в основном меню.

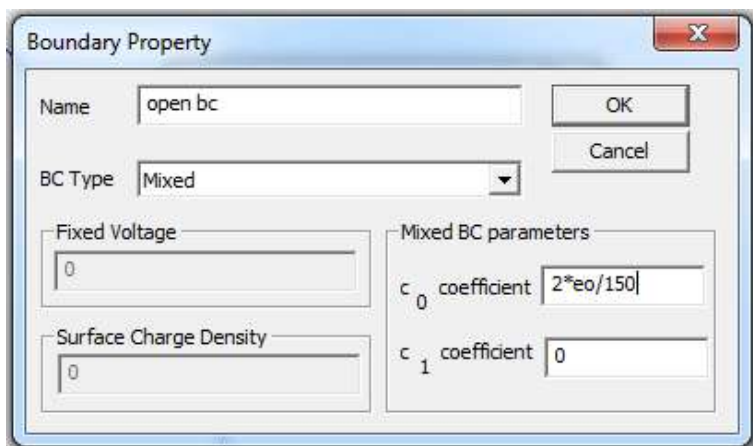
Выберите **Properties**, а затем **Conductors** из меню и создайте проводник с именем «+ 100 В» с заданным напряжением 100 В.

Создайте фиксированную границу напряжения для линии симметрии. Сделайте это, выбрав **Properties**, а затем **Boundary** в основном меню. Нажмите кнопку **Add Property** и создайте свойство с именем , для которого заданное напряжение равно 0 В.

Зададим свойства для внешней границы, выбрав **Properties**, а затем **Boundary** в основном меню. Переименуйте вашу новую границу  и измените «BC Type» на **Mixed**. Учитывая, что анализируемая система находится близко к центру дуги (обычно это полный круг, либо полукруг), «коэффициент  $\epsilon_0$ » можно установить равным  $(2\epsilon_0/r)$ , где  $r$  - радиус дуги в метрах. В этом случае вы можете позволить программе выполнить вычисления, введя строку:


$2*\epsilon_0/150$

в поле для редактирования коэффициента  $c_0$  (коэффициент  $c_1$  должен быть равен нулю). Константа  $\epsilon_0$  зарезервирована в FEMM и равна диэлектрической проницаемости вакуума  $\epsilon_0$  в единицах СИ.



Выберите дугу в четверть круга, представляющую внешнюю границу, щелкнув правой кнопкой мыши на ней или рядом с ней (кнопка панели инструментов «Дуга» также должна быть нажата). Нажмите пробел и назначьте граничное условие `open bc`.

Выберите полукруг, представляющий поверхность одной из проводящих сфер. Нажмите пробел и назначьте «+ 100 В» в качестве проводника для свойства для этой поверхности.

Переключившись в режим сегмента , назначьте нулевое граничное условие для линии симметрии при  $z = 0$ . В режиме метки блока поставьте метку внутри ограниченной области. Измените `Block type` на `Air`, а `Mesh size` на 1.

После завершения моделируемая область будет выглядеть так, как показано на рисунке 7.2.

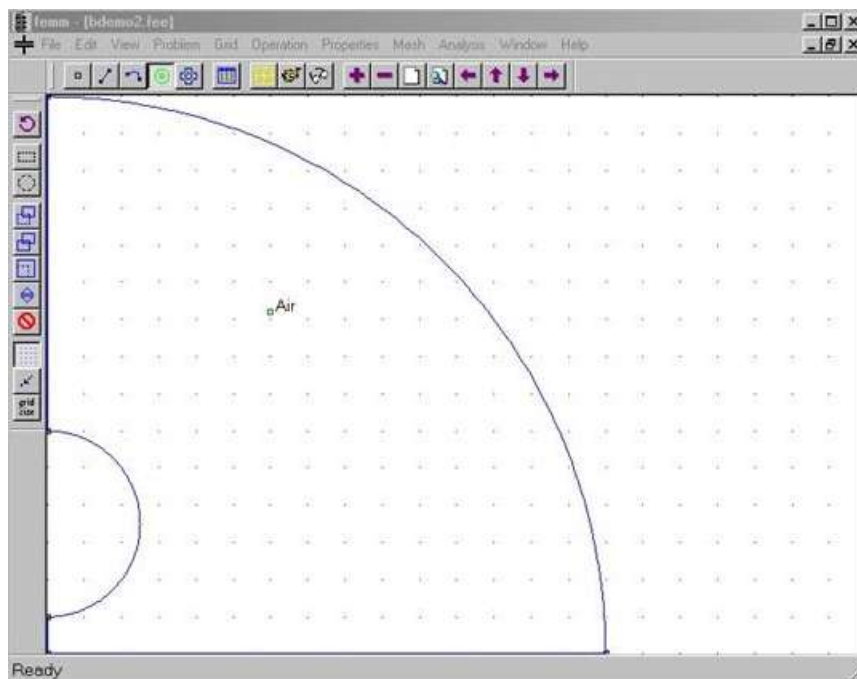



Рисунок 7.2 - Пример геометрии, показанной в препроцессоре электростатики

Теперь сгенерируйте сетку, выполните расчет и откройте решение в окне постпроцессора , чтобы отобразить результирующие

напряжения, как описано в примере 1. Полученное решение должно выглядеть так, как показано на рисунке 7.3.

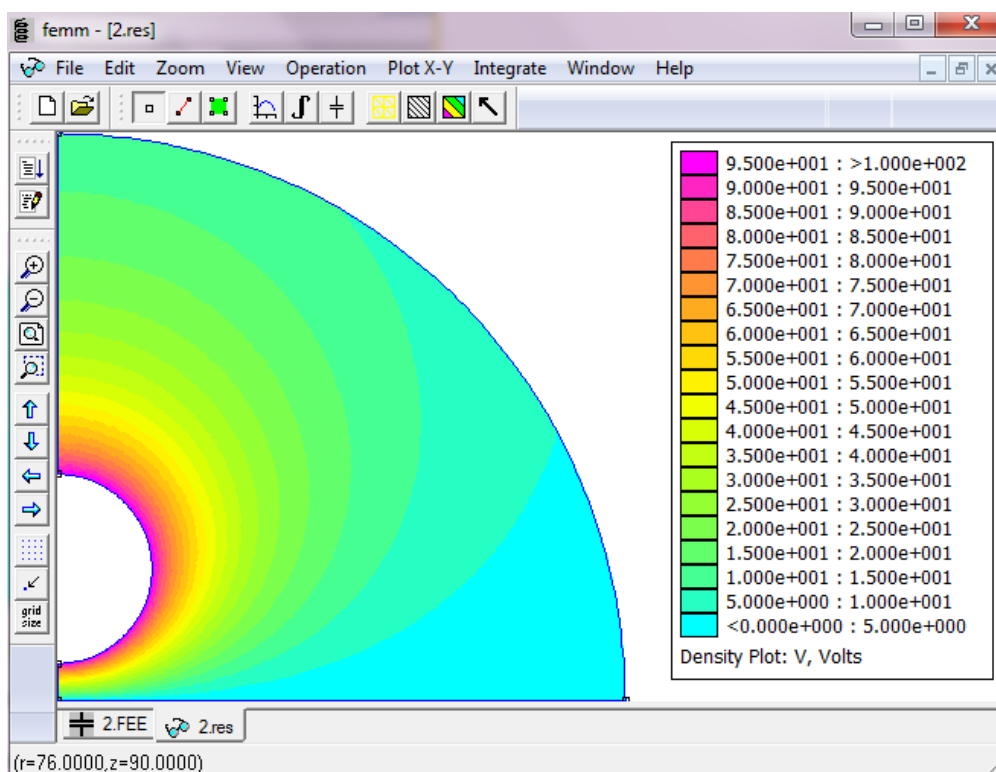


Рисунок 7.3 – Решение для примера, представленного в электростатическом постпроцессоре

Выбрав **View**, а затем **Conductor Props** из главного меню (или нажав кнопку ) , можно получить заряд  $4.4769e-007$  Кл (0,448 мкКл) на сфере.

В целях сравнения интересно повторить анализ с «нулевым» граничным условием, примененным к внешней границе. При внешней границе **zero** земля находится на конечном расстоянии, а не на бесконечности. В этом случае заряд составляет  $4,58617e-007$  Кл (0,459 мкКл) - наличие искусственной границы немного повышает емкость системы.

### Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проект в FEMM.
2. Создайте аналогичный проект с другими параметрами: расстояние между центрами сфер 80 см, радиусы сфер равны 20 см, на верхнюю сферу подан потенциал 12 В, на нижнюю – -12 В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### Расчёт емкости конденсатора квадратного сечения в FEMM и Agros2D

#### *Постановка задачи*

Рассчитать емкость метрового конденсатора квадратного сечения, сторона внешней обкладки которого равна 4 см, а внутренней – 2 см (смотри рисунок 8.1). Диэлектрик между пластинами – воздух. Напряжение между обкладками 1 В. Внутренняя обкладка заряжена положительно. Для расчетов вследствие симметрии достаточно смоделировать только  $\frac{1}{4}$  конденсатора, а потом полученные аддитивные величины умножить на 4.

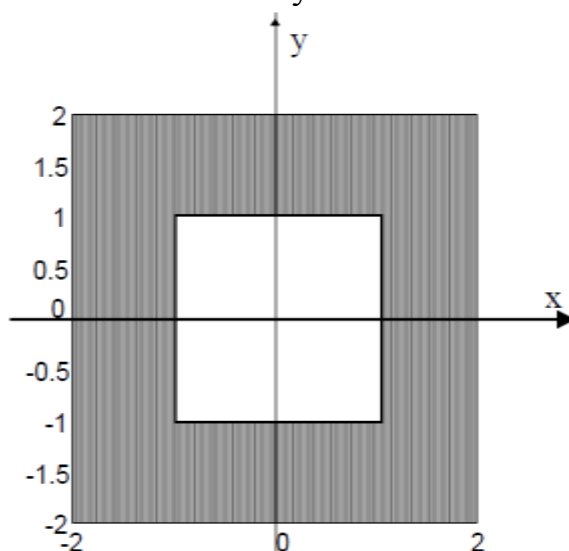


Рисунок 8.1 - Конденсатор квадратного поперечного сечения

#### **1. Расчёт емкости конденсатора квадратного сечения в FEMM**

Для создания этой модели необходимо выполнить следующие шаги:


##### 1.1 Создание модели


Запустите FEMM в разделе меню «Пуск».

После запуска программы нажимаем **File**, затем **New** из главного меню.

Выберите **Electrostatics Problem** в появившемся диалоговом окне **Create a new problem**.

Нажмите **OK**.

Выберите «узлы» на панели инструментов (это крайняя кнопка слева ) и поместите 6 узлов (например, (0,1), (1, 1), (1,0), (2,0), (2,2) и (0,2)). Это эскиз верхней правой четверти квадратного сечения конденсатора (смотри рисунок 8.2). Узлы можно размещать, перемещая указатель мыши в нужное место и нажимая левую кнопку мыши, или нажимая клавишу <ТАВ> и вручную вводя координаты точки через всплывающее диалоговое окно.


Выберите «линии» на панели инструментов (вторая кнопка слева ). Чтобы выбрать узел в качестве точки, ограничивающей линию, щелкните левой кнопкой мыши рядом с нужной точкой.

##### 1.2 Задание материалов модели



Выберите **Properties**, затем **Materials** в основном меню. В появившемся диалоговом окне нажмите кнопку **Add Property**. Появится диалоговое окно с полями редактирования для различных свойств материала. Измените название свойства с **New Material** на **air**. По умолчанию диэлектрическая проницаемость нового материала равна 1, что нам и требуется для воздуха. Нажмите кнопку **OK**, чтобы завершить создание материала.

### 1.3 Определение материалов для каждой замкнутой области

Теперь нажмите «Метки блока» (кнопка на панели инструментов с изображением зеленых кружков ) и поместите метку блока в середине области решения, между внутренним и внешним квадратами. Как и точки узлов, метки блоков могут быть размещены либо щелчком левой кнопки мыши, либо в диалоговом окне <ТАВ>.

Щелкните правой кнопкой мыши на узле метки блока, чтобы узел стал красным, что означает, что он выбран. Нажмите пробел, чтобы открыть метку выбранного блока. Появится диалоговое окно, содержащее свойства, назначенные выбранной метке. Установите **Block type** на **Air**. Когда флажок  **Let Triangle choose Mesh Size** установлен, генератор сетки автоматически выбирает размер элемента. Размер сетки по умолчанию подходит для большинства задач. Однако, если вам нужна более мелкая сетка, вы можете снять флажок  **Let Triangle choose Mesh Size** и вручную ввести значение **Mesh size**. Параметр размера ячейки определяет ограничение на максимально возможный размер элементов, разрешенный в соответствующем разделе. Генератор сетки пытается заполнить область почти равносторонними треугольниками, у которых стороны примерно такой же длины, что и указанный параметр **Mesh size**.

### 1.4 Подача напряжения.

Выберите **Properties**, затем **Conductors** в строке меню, затем нажмите кнопку **Add Property**.

Замените имя **New Conductor** на **zero** (отрицательный электрод). Выберите переключатель  **Prescribed Voltage**. Введите 0 В в качестве значения в соответствующем поле редактирования и нажмите **OK**. Вы только что определили проводник с фиксированным напряжением 0 В, но вам еще предстоит назначить это условие определенной части модели.

Повторите вышеуказанный процесс, но вместо этого назовите новое граничное условие **one** (положительный электрод) и примените, введите заданное значение напряжения 1В.

Выберите «линии» на панели инструментов, затем щелкните правой кнопкой мыши на каждом из двух сегментов, принадлежащих внутреннему проводнику. Когда сегмент становится красным, вы выбрали его. Теперь нажмите пробел, и появится окно **Segment Property**. Из выпадающего списка **In Conductor** измените выбор с **<None>** на **one**. Повторите этот процесс для внешнего проводника, но установите тип проводника на **zero**.

### 1.5 Установление характеристик задачи.

Выберите **Problem** в строке меню. В появившемся диалоговом окне убедитесь, что тип проблемы **Planar**. Установите единицы измерения длины в **Centimeters** и установите для параметра **Depth** (глубина) значение 100 см (длина конденсатора 1 м). Точность решателя по умолчанию  $10^{-8}$  (т.е. решение, определенное с точностью до одной точности), как правило, изменять не нужно. При желании в поле **Comment** можно добавить описательный комментарий.

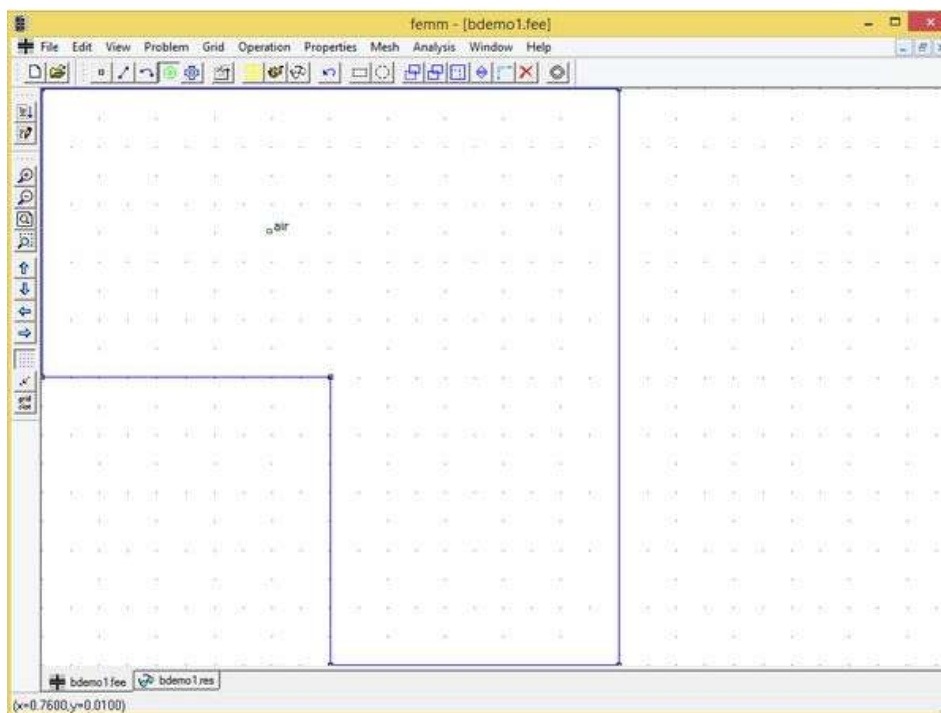





Рисунок 8.2 - Завершенный пример в препроцессоре электростатики

### 1.6. Генерация сетки и решение.

Теперь сохраните файл и нажмите кнопку на панели инструментов с желтой сеткой: . Это действие создает треугольную сетку. Если интервал сетки кажется слишком мелким или слишком грубым, вы можете выбрать метки блоков или сегменты линий и отрегулировать размер сетки, определенный в свойствах каждого объекта. Когда вы сетка построена, нажмите на изображение кнопки «повернуть кривошип» , чтобы запустить алгоритм конечно-элементного анализа для вашей модели.

Информация о состоянии обработки будет отображаться в диалоговом окне во время работы решателя. Если индикаторы выполнения не движутся, вероятно, следует отменить расчет. Для этой конкретной задачи вычисления должны быть выполнены менее чем за секунду (хотя время решения сильно зависит от скорости машины, выполняющей анализ). После завершения вычислений, окно состояния исчезает.

### 1.7 Визуализация результатов

Нажмите на изображение значка очков , чтобы открыть решение в окне постпроцессора. Решение будет отображено, как показано на рисунке

8.3. Теперь по умолчанию при запуске постпроцессора поле визуализируется с помощью цвета.

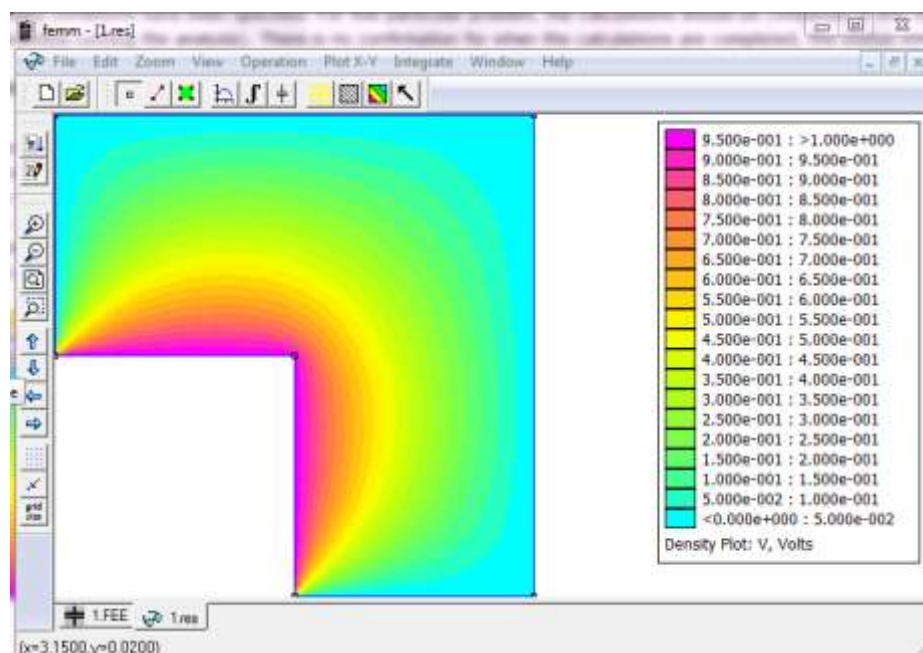


Рисунок 8.3 – Визуализация поля внутри конденсатора.

Заряд на каждом проводнике можно определить, выбрав **View**, а затем **Conductor Props** в главном меню постпроцессора. Затем появится диалоговое окно, которое отображает напряжение и общий заряд для каждого определенного проводника. Для «одного» проводника с размером ячейки по умолчанию зарегистрированный заряд составляет  $2,26637 \cdot 10^{-11}$  Кл (см. рисунок 8.4).

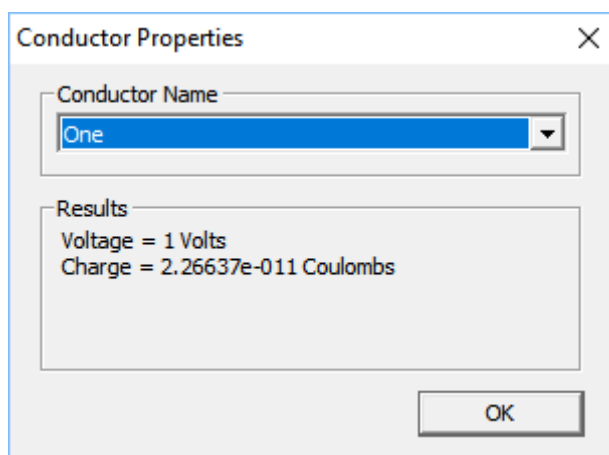


Рисунок 8.4 – Окно свойства проводника

В этом окне есть все данные для расчета емкости, так как заряд на одной из пластин конденсатора равен произведению емкости на напряжение, следовательно  $C = Q/U$ . Поскольку модель включает лишь  $1/4$  всей геометрии конденсатора, для нахождения его ёмкости следует данное отношение умножить на 4. После несложных вычислений находим ёмкость конденсатора  $9,06548 \cdot 10^{11}$  Ф или 90,6548 пФ.

## 2. Расчёт емкости конденсатора квадратного сечения в Agros2D

### 2.1 Создание модели

Необходимо запустить Agros2D (ярлык находится на рабочем столе или в разделе меню «Пуск», рисунок 8.5).



Рисунок 8.5 - Ярлык Agros2D

После запуска программы есть возможность ознакомиться с руководствами и примерами.

Далее следует задать тип координат «Планарный» и тип сетки «Triangle - треугольная», а также «Добавить поле» – в нашем случае «Electrostatics field» (рисунок 8.6).

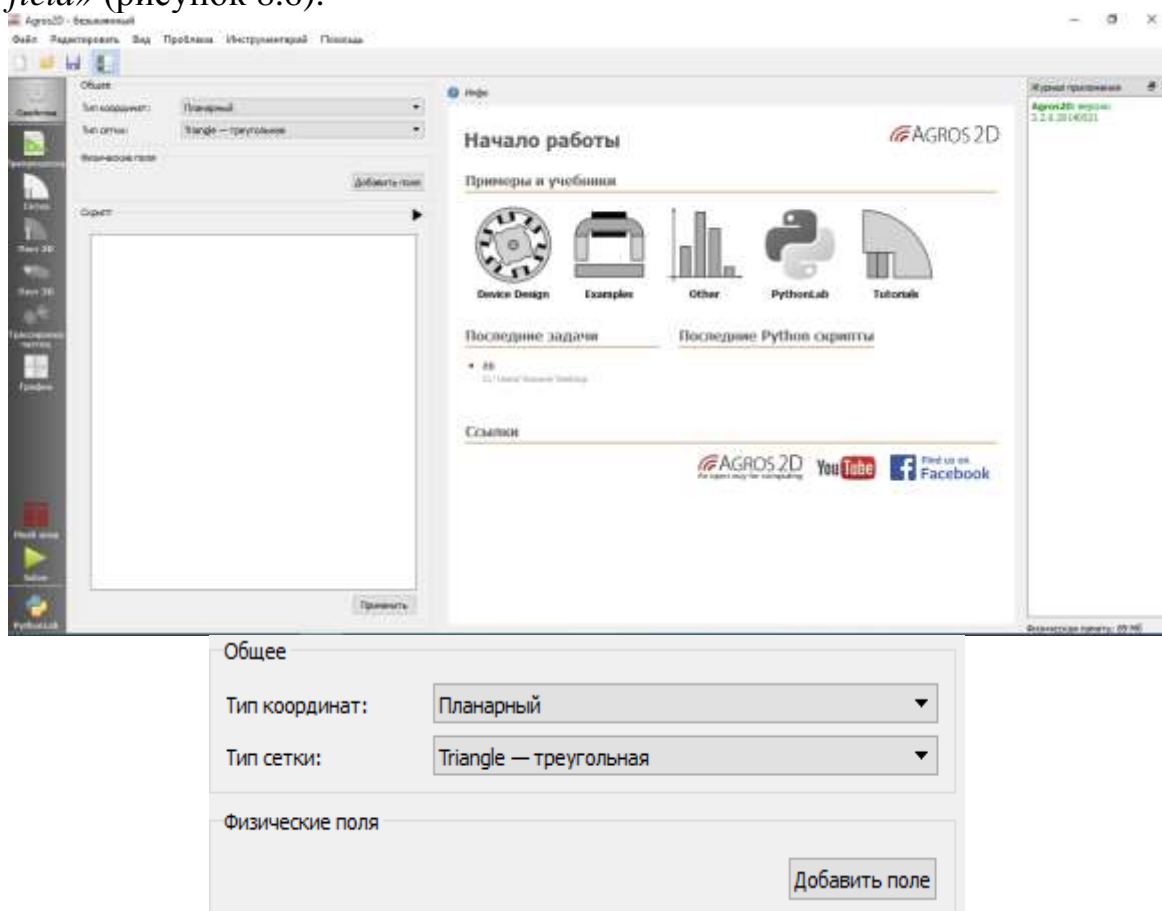



Рисунок 8.6 – Выбор общих свойств

Для перехода к построению модели нажимаем на среду «Препроцессор» (выглядит следующим образом (рисунок 8.7)



Рисунок 8.7 - Изображение препроцессора на панели управления

Перед нами высвечивается поле – «Редактор геометрии». Для того чтобы установить узлы, нажмите правой кнопкой мышки на поле. В появившемся списке выберите команду «New node». Далее задайте

соответствующие координаты 6-ти узлов в окне (например, (0,1), (1,1), (1,0), (2,0), (2,2) и (0,2)). Другой вариант: выберите инструмент *Работа с узлами* (на панели инструментов ) и разместите узлы, 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. Это эскиз верхней правой четверти квадратного сечения конденсатора.

Увеличивать/уменьшать масштаб поля возможно с помощью колесика мышки.

Для образования линий нажмите правой кнопкой мышки на поле. В появившемся списке выберите команду «*New edge*». Задайте параметры ребра. Для соединения узлов необходимо указать начальный и конечный узлы (у каждого узла имеются координаты и индекс - узнать их можно путем наведения курсора на узел).

Так, для соединения точек, указанных на рисунке, необходимо выбрать следующие координаты (рисунок 8.8):

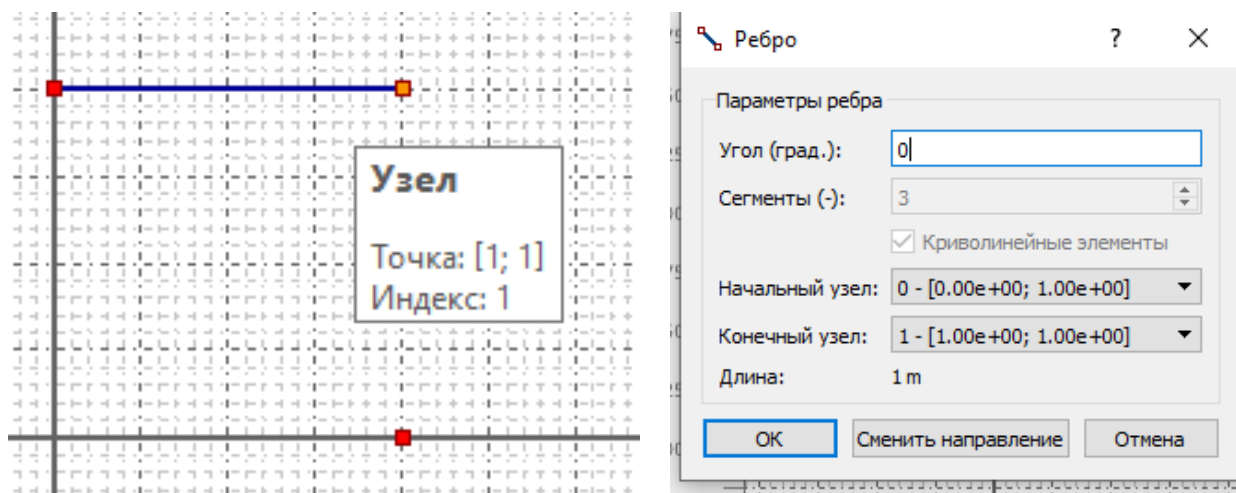



Рисунок 8.8 – Параметры ребер и их построение

Другой вариант: выберите инструмент *Работа с линиями* (на панели инструментов ) . Соедините все узлы, одновременно зажав клавишу *Ctrl*.

## 2.2 Задание материалов модели

Для выполнения поставленной задачи нажмите правой кнопкой мыши на поле. В высветившемся списке выберите команду «*New material*» или воспользуйтесь сочетанием клавиш *Alt+M*. Присвойте имя «*Air*» (воздух), по умолчанию диэлектрическая проницаемость нового материала равна 1, что и соответствует воздуху (рисунок 8.9). Нажмите кнопку *Ok* для завершения создания материала.

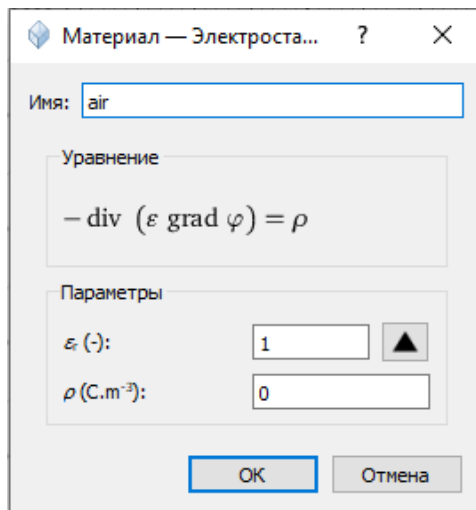



Рисунок 8.9 – Присвоение материала

### 2.3 Определение материалов для каждой замкнутой области

Нажмите правой кнопкой мыши на поле. Чтобы поставить метку, необходимо выбрать в появившемся списке команду «*New label*», задайте координаты таким образом, чтобы метка находилась внутри замкнутой области между внутренним и внешним квадратами (рисунок. 16).

Другой вариант: выберите инструмент *Работа с метками* (на панели инструментов ) и поместите метку блока в середине области решения, между внутренним и внешним квадратами. Как и точки, метки блоков могут быть размещены либо щелчком левой кнопки мыши, с одновременным нажатием *Ctrl*, либо в диалоговом окне *Alt+L*.

Щелкните левой кнопкой мыши на узле метки блока, чтобы узел стал темным, что означает, что он выбран. Нажмите пробел, чтобы открыть метку выбранного блока.

В появившемся диалоговом окне с перечнем свойств метки, задайте материал «*Air*» (рисунок 8.10).

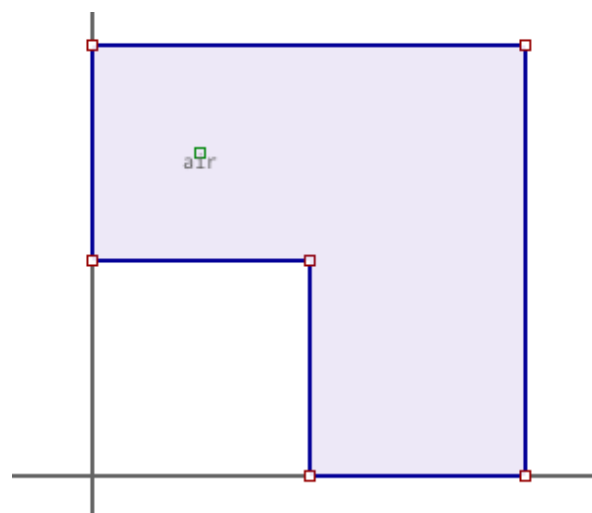
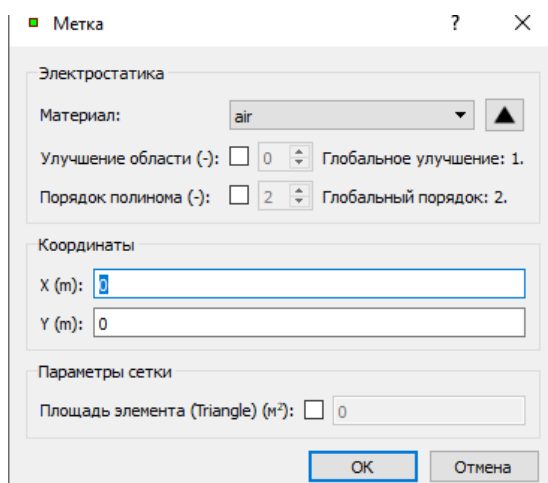


Рисунок. 8.10 – Установка материала

## 2.4 Граничные условия


Для задания граничных условий (чтобы подать на конденсатор напряжение), нажмите правой кнопкой мыши на поле, в появившемся списке выберите команду «*New boundary condition*» или воспользуйтесь сочетанием клавиш *Alt+B*.

Задайте следующие граничные условия с типом «*Фикс. напряжение*» (рисунок. 17):

- Имя - Zero,  $\varphi = 0$  В (отрицательный электрод);
- Имя - One,  $\varphi = 1$  В (положительный электрод).

И одно граничное условие с типом «*Поверхностная плотность заряда*»:

- Имя – Neumann,  $\sigma = 0$  Кл/м<sup>2</sup>.

Выберите инструмент *Работа с линиями*  на панели инструментов, затем щелкните левой кнопкой мыши на каждом из двух сегментов, принадлежащих внутреннему проводнику. Когда сегмент стал черной жирной прерывистой линией – вы выбрали его. Нажмите пробел и присвойте тип проводника – Zero вместо None.

Повторите этот процесс для внешнего проводника, установив тип – One (рисунок 8.11) и для граней, имеющих заряд, равный нулю, установив тип – Neumann.

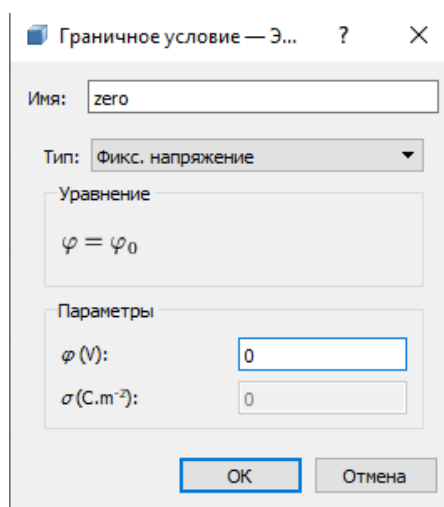


Рисунок 8.11 – Добавление граничных условий

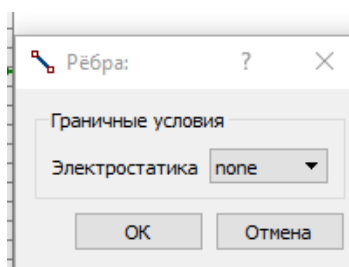


Рисунок. 8.12 – Присвоение типа проводника

## 2.5 Генерация сетки и решение

Создайте треугольную сетку с помощью кнопки слева «*Mesh area*» (рисунок 8.13)

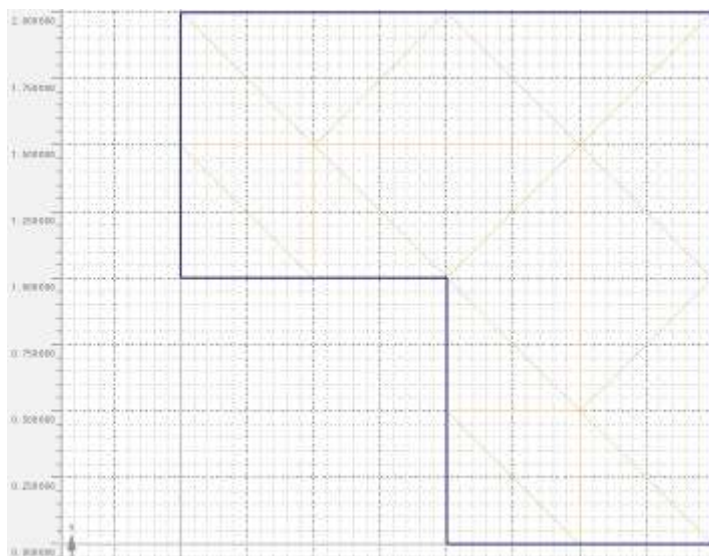


Рисунок 8.13 – Генерация сетки

Проведите расчеты характеристик электрического поля, нажав кнопку «*Solve*» (рисунок 8.14)



Рисунок 8.14 – Изображение Solve на панели управления

## 2.6 Отображение результатов



Для того, чтобы увидеть результаты расчетов в окне постпроцессора,



нажмите на кнопку

Информация о состоянии обработки отображается в диалоговом окне – «*Журнал применения*». Можно регулировать цвета, используя палитру. При изменении параметров нажмите кнопку «*Применить*».

Решение будет отображено, как показано на рисунке 8.15. Теперь по умолчанию при запуске постпроцессора поле визуализируется с помощью цвета.

Заряд на каждом проводнике можно определить, выбрав инструмент *Поверхностные интегралы* (на панели инструментов ) , далее выделяем необходимые для измерения грани и нажимаем «*Пробел*» или «*Выбрать по метке*»  в выпадающем списке *One*. Затем появится диалоговое окно, которое отображает характеристики для каждого определенного проводника. Для проводника *One* зарегистрированный заряд составляет  $1,952 \cdot 10^{-11}$  Кл (рисунок 8.16).

Если диалоговое окно с результатами не высветилось, необходимо выбрать «*Вид*», в появившемся списке нажать на «*Панели*» и установить галочку на команде «*Результаты*».



В этом окне есть все данные для расчета емкости, так как заряд на одной из пластин конденсатора равен произведению емкости на напряжение, следовательно,

$$C = \frac{q}{U},$$

заряд  $q=1.952e^{-11}$  Кл, а  $U=1$  В, найдем  $C$  ( $C=1.952e^{-11}$  Ф).

Поскольку модель включает лишь  $\frac{1}{4}$  всей геометрии конденсатора, для нахождения его ёмкости следует данное отношение умножить на 4. После несложных вычислений находим ёмкость конденсатора  $7,808 \cdot 10^{-11}$  Ф

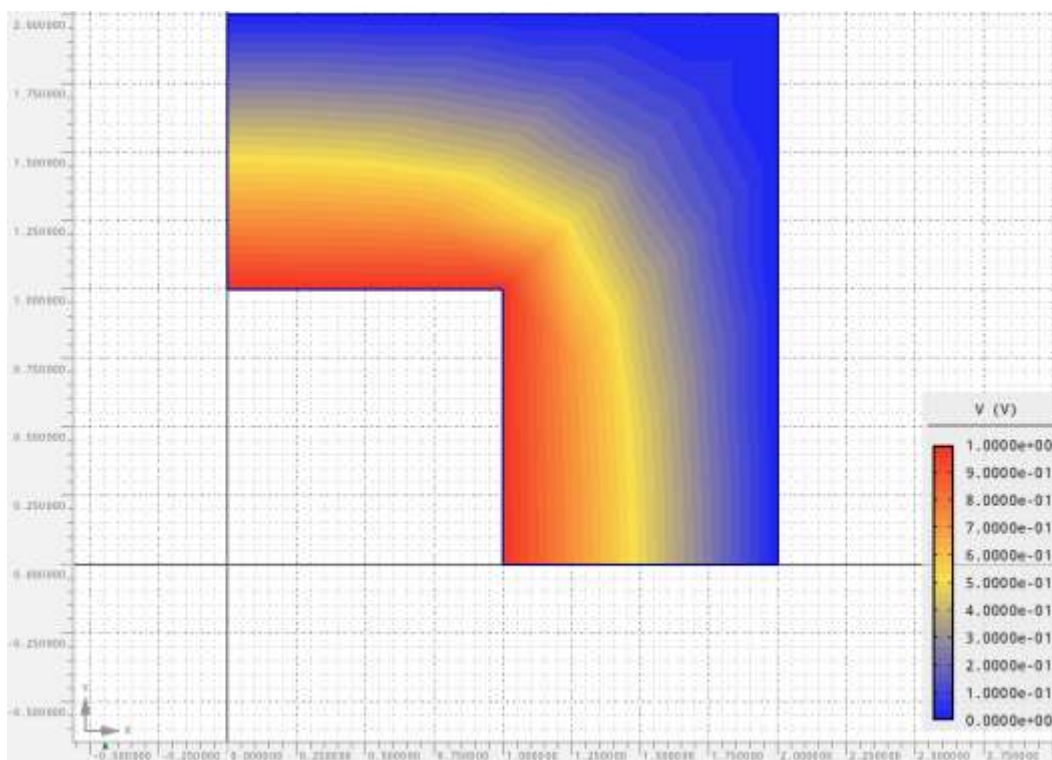


Рисунок 8.15 – Визуализация поля внутри конденсатора

Результаты

#### Поверхностные интегралы

##### Электростатика

<b>Длина</b>	/	2.000e+00	m
<b>Поверхность</b>	S	2.000e+00	m <sup>2</sup>
<b>Заряд</b>	Q	1.952e-11	C
<b>Момент Максвелла</b>	$T_m$	5.075e-12	Nm
<b>Сила Максвелла — x</b>	$F_{Tx}$	-1.079e-11	N
<b>Сила Максвелла — y</b>	$F_{Ty}$	-1.079e-11	N

Рисунок 8.16 – Окно свойств проводника

*Примечание.* Горячие клавиши:

**Alt+N** – new node

**Alt+E** – new edge

**Alt+L** – new label

**Alt+B** – new boundary condition

**Alt+M** – new material

**Пробел** – свойства объекта

## Задания

1. По описаниям, представленным выше, создайте проекты в FEMM и Agros2D.
2. Создайте аналогичные проекты с другими параметрами: длина (глубина) – 1 м, сторона внешней обкладки которого равна 8 см, а внутренней – 4 см, напряжение между обкладками 12 В, внутренняя обкладка заряжена положительно, диэлектрик между пластинами – воздух.

## Список используемых источников

1. Autodesk Inventor [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview> (Дата обращения: 01.02.2022).
2. FEMM [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.femm.info/wiki/HomePage> (Дата обращения: 01.02.2022).
3. FEMM [Электронный ресурс]: образовательный портал. – Режим доступа: <https://www.femm.info/wiki/Documentation/> (Дата обращения: 01.02.2022).
4. Examples [Электронный ресурс]: образовательный портал. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/Examples.html> (Дата обращения: 01.02.2022).
5. FEMM для всех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php> (Дата обращения 01.02.2022).
6. Magnetics simulation with FEMM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://firsttimeprogrammer.blogspot.com/2017/09/magnetics-and-electrostatics.html> (дата обращения 01.02.2022).
7. Володин, В.Я. Моделирование в программе FEMM. Краткая пошаговая инструкция. Система индукционного нагрева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://valvolodin.narod.ru/articles/femm\\_mod.pdf](http://valvolodin.narod.ru/articles/femm_mod.pdf) (Дата обращения 01.02.2022).
8. Володин, В.Я. Моделирование в программе FEMM. Часть 2.Измерение индуктивности рассеяния трансформатора. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://valvolodin.narod.ru/articles/femm\\_mod\\_2.pdf](http://valvolodin.narod.ru/articles/femm_mod_2.pdf) (Дата обращения 01.02.2022).
9. Agros2D [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.agros2d.org/> (Дата обращения: 01.02.2022).