

## БЫСТРЫЙ СТАРТ В FEMM

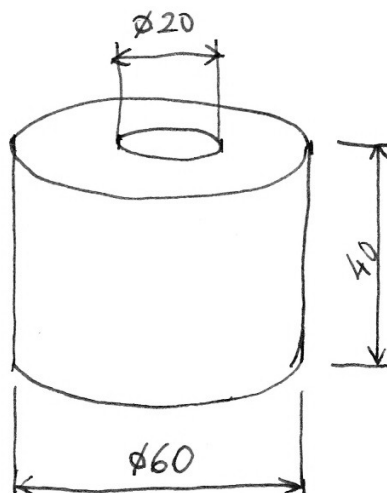
Вольный перевод В.В. Скрежендевского руководства  
FEMM 4.2 Magnetostatic Tutorial by David Meeker [dmeeker@ieee.org](mailto:dmeeker@ieee.org)

FEMM (Finite Element Method Magnetics) — это пакет программ для решения низкочастотных электромагнитных задач для плоских двумерных и осесимметричных объектов методом конечных элементов. В настоящее время программа может использоваться для решения как линейных, так нелинейных задач постоянного и переменного магнитного поля, а также для решения линейных задач электростатического поля и задач стационарного теплового потока. Программа является бесплатной и ее можно скачать на страничке: <http://www.femm.info/wiki/Download>.

Расчет постоянного магнитного поля

### Постановка задачи

Создать модель магнитного поля катушки с током из медного провода в воздухе, показанной на рисунке 1.



150 витков  
Провод 18 AWG  
Ø 1,19 мм по меди  
Толщина изоляции  
0,55 мм

Рисунок 1 — Эскиз катушки

### Пошаговая инструкция

**1 Создать новую модель.** Меню «File» > «New». В открывшемся окне (рисунок 2) выбрать пункт «Magnetics Problem».

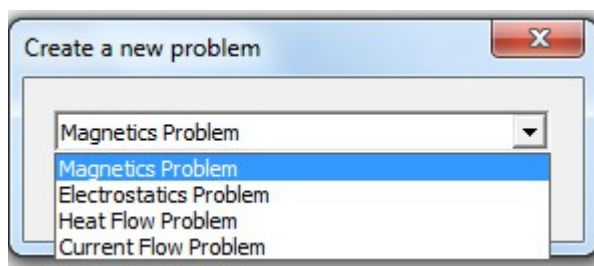


Рисунок 2 – Окно создать новую задачу

**2 Выбор типа модели.** Меню «Problem». В окне «Problem Definition» выполнить настройки:

- тип модели («Problem Type»): плоская (planar), осесимметричная (axisymmetric);
- линейные единицы измерения («Length Units»);
- частота («Frequency»).

Выберите опции как на рисунке 3. При осесимметричной (axisymmetric) модели координаты задаются с помощью радиуса  $r$  и оси  $z$ . Ось  $z$  совпадает с осью симметрии модели.

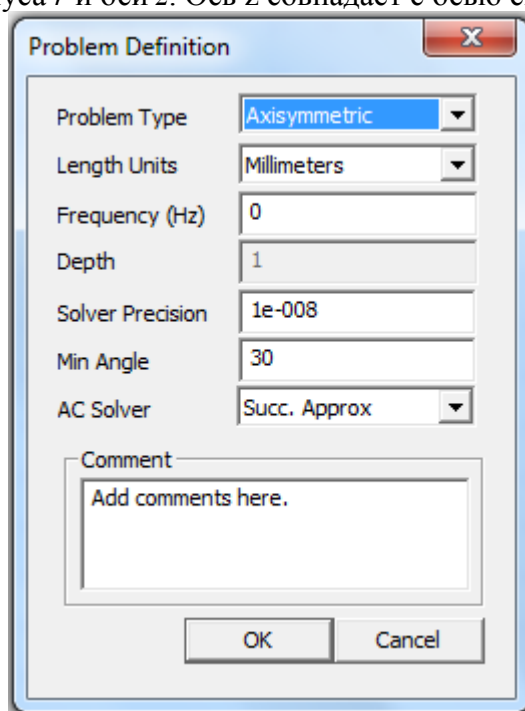





Рисунок 3 – Окно Problem Definition

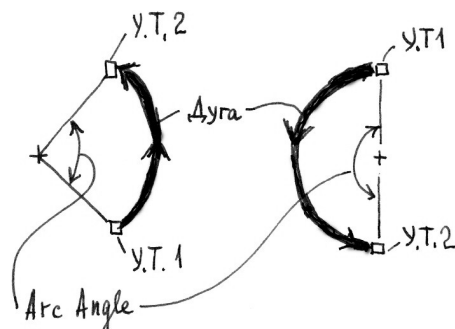
**3 Зададим видимую на экране область модели:** Меню «View» > «Keyboard», в открывшемся окне задать границы области моделирования Низ («Bottom») минус 100, Лево («Left») 0, Верх («Top») 100, Право («Right») 100. Правая граница корректируется автоматически под размер экрана.

Для задания геометрических параметров области моделирования используются инструменты для рисования. Особенность программы – необходимость задания узловых точек с последующим их соединением необходимыми линиями или кривыми. Для выбора уже созданного элемента используется щелчок правой кнопкой мыши.

**4 Проведем дугу ограничения области моделирования.** Ограничим область модели сферой радиусом 100 мм. Нажмите на панели инструментов кнопку . Узловые точки можно расставить с помощью щелчка левой клавиши мыши, но лучше это делать через кнопку <Tab>. При нажатии этой кнопки открывается окно ввода координат. Разместите три узловые точки с координатами: (0, 0), (0, 100), (0, -100). Текущие координаты курсора мыши отобра-


жаются в левом нижнем углу окна программы. Нажмите на панели инструментов кнопку . Выберите с помощью щелчка левой клавиши мыши последовательно две узловые точки для построения дуги. В появившемся окне задайте угол «дуги» («Arc Angle»)  $180^\circ$  и длину отрезка для построения дуги («Max. Segment, Degrees»)  $2,5^\circ$ . Нажмите ОК. Появится дуга с заданными параметрами (рисунок 4). Построение дуги осуществляется против часовой стрелки, поэтому положение дуги относительно узловых точек зависит от порядка выбора узловых точек.


Соедините узловые точки с координатами (0, 100), (0, -100) с помощью линии (кнопка ), чтобы получить замкнутую область.



У.Т. - узловая точка

Рисунок 4 – Параметры дуги

**5 Нарисуйте катушку.** Разместите четыре узловые точки с координатами: (10, -20), (30, -20), (30, 20). Соедините их линиями с помощью линий (кнопка ).

**6 Разместите метки блока** («Block Labels» кнопка ) на соответствующих областях модели (воздух и катушка). Эти метки используются для задания свойств выбранной области. По умолчанию метки обозначены <None>. В следующих пунктах указано как связать свойства с меткой блока.

**7 Вставка материала в модель.** Меню «Properties» > «Materials Library», перетащите из левой части окна «Materials Library» в правую материалы воздух («Air») и медный провод («Copper») 18 AWG, нажмите ОК.

**8 Создание цепи с током.** Меню «Properties» > «Circuits», в открывшемся окне нажать кнопку «Add Property». В окне «Circuit Property» заполнить поле «Name» (латинскими буквами) и установить тип обмотки (соединение витков в обмотке): параллельная (Parallel), последовательная (Series). Задать ток в обмотке (поле «Circuit Current, Amps»).

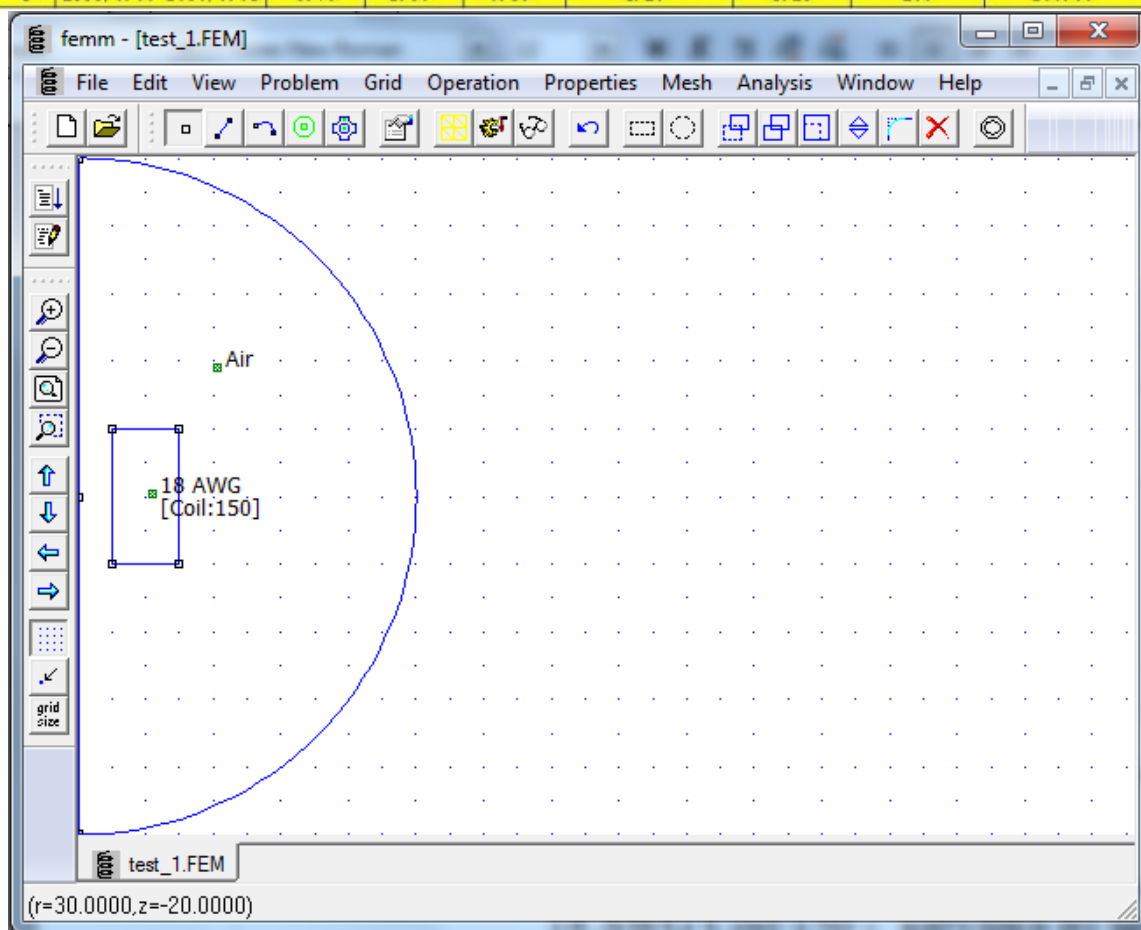
**9 Связать метки блоков со свойствами.** Для этого выделить щелчком правой кнопки мыши соответствующую метку и нажать пробел – откроется окно «Properties for Selected Block». В поле «Block Type» из выпадающего списка (этот список формируется на шаге 7) выбрать материал. Отмените «Let Triangle choose Mesh Size» и установите шаг сетки («Mesh Size») равным 1 мм. Если в этой области нет цепи с током нажать ОК.

Для области, содержащей цепь с током, необходимо в поле «In Circuit» из выпадающего списка выбрать необходимую цепь (этот список формируется на шаге 8), задать число витков («Numbers of Turns»). Отмените «Let Triangle choose Mesh Size» и установите шаг сетки («Mesh Size») равным 1 мм. В результате должно получиться что-то похожее на рисунок 5.

Ось симметрии модели проходит через начало координат (ось z) и совпадает с отрезком (0, -30)–(0, 30). На экране мы видим сечение половины сферы плоскостью, проходящей через ось z.

Таблица 1 — Справочник на обмоточные провода

导线号 AWG	线数/线径 Compos. No. × ØMM	直径 (毫米) Diameter (mm)	被覆厚度 Jacket Thick (mm)	完成外径 (毫米) Over Diameter (mm)	导体电阻 (欧姆/千米) Realst max cuc, c20°C (ohm/km)	平方毫米 square millimeter	安培 Ampere	米/卷 Packing Mt/coils
30	20/0.06 11/0.08	0.3	0.55	1.20	331.00	0.05	0.80	100.00
28	28/0.06 16/0.08	0.36	0.55	1.30	227.0	0.08	1.25	100.00
26	42/0.06 30/0.08	0.46	0.55	1.50	123.00	0.14	3.50	100.00
24	70/0.06 40/0.08	0.61	0.55	1.60	97.60	0.20	5.00	100.00
22	11/0.06 60/0.08	0.78	0.55	1.70	88.60	0.33	8.73	100.00
20	175/0.06 100/0.08	0.92	0.55	1.80	52.50	0.50	13.87	100.00
18	294/0.06 150/0.08	1.19	0.55	2.30	39.50	0.75	22.00	100.00
17	210/0.08 210/0.08	1.33	0.80	2.70	21.40	1.00	31.00	100.00
16	483/0.06 252/0.08	1.53	0.80	3.00	24.40	0.27	35.00	100.00
15	856/0.05 336/0.08	1.69	0.80	3.10	20.02	1.68	42.00	100.00
14	707/0.06 400/0.08	1.78	0.90	3.50	15.60	2.07	55.60	100.00
13	930/0.06 500/0.08	2.06	0.95	4.00	12.50	2.50	65.00	100.00
12	1062/0.06 680/0.08	2.48	1.00	4.50	9.80	3.40	88.40	100.00
11	1480/0.06 800/0.08	2.59	1.00	4.60	7.38	3.96	100.0	100.00
10	1780/0.06 1050/0.08	3.03	1.25	5.50	6.30	5.30	140.6	100.00
8	2933/0.06 1650/0.08	3.75	1.50	6.80	4.20	8.29	200	100.00






18 AWG Coil:150 – катушка из медного провода, 150 витков;

Air – воздух, окружающий катушку

Рисунок 5 – Геометрическое описание модели

**10 Создание граничных условий.** Меню «Properties» > «Boundary». В поле «Name» наберите ABC (asymptotic boundary condition - асимптотическое граничное условие), в поле «BC Type» установите значение Mixed. Установите коэффициенты  $c_0$  и  $c_1$  равными нулю. Сохраните созданную модель.

Теперь необходимо связать граничные условия с дугой ограничивающей область моделирования. Выберите инструмент дуга  и щелчком правой кнопки мыши выберите дугу ограничивающей область моделирования, нажмите пробел и в открывшемся окне «Arc Segment Properties» в поле «Boundary Cond.» из выпадающего списка выбрать «ABC». В осесимметричной модели отрезок совпадающий с осью  $z$  автоматически считается с нулевым потенциалом.

**11 Генерация сетки и запуск моделирования.** Нажмите кнопку . В результате будет сгенерирована треугольная сетка конечно-элементной модели. Появится окно с описанием количества узлов модели. Нажимаем ОК. Теперь нажмите кнопку с «кривым стартером»  для расчета. На экране появится окно, отображающее процесс расчета. При большом количестве узлов это может занять довольно много времени.

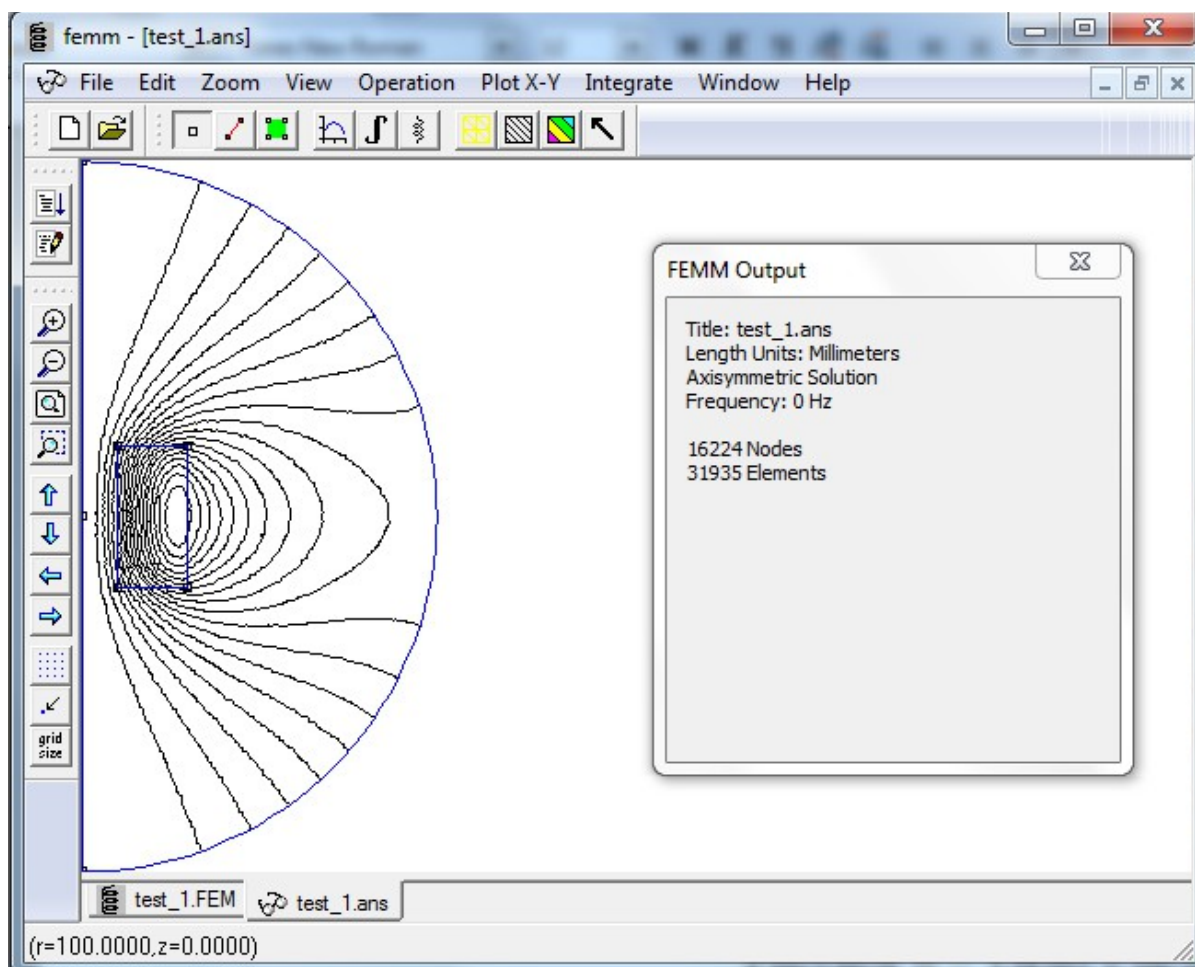







Рисунок 6 – Окно с результатами расчета

**12 Вывод результатов расчета.** Нажмите кнопку . Откроется окно с результатами расчета (post-processor window), которое показано на рисунке 6. Здесь мы видим изолинии магнитного потока (flux). Параметры его отображения мы можем изменить, нажав кнопку . С помощью кнопки  мы можем получить доступ к параметрам отображения индук-



ции (flux density) и напряженности (field Intensity) магнитного поля. Кнопка  позволяет посмотреть параметры катушки (Coil). Для просмотра параметров в произвольной точке необходимо открыть окно «Output» (меню «View» > «Output window») и выбрать инструмент точка (point) . При щелчках левой кнопкой мыши на области моделирования в окне «FEMM Output» будут отображаться рассчитанные параметры для выбранной точки.

Более подробное описание программы FEMM на английском языке можно скачать на страничке: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>

## Расчет стационарного теплового потока

Вольный перевод В.В. Скрежендевского руководства

**FEMM Heat Flow Tutorial** by David Meeker [dmeeker@ieee.org](mailto:dmeeker@ieee.org)

### Постановка задачи

Создать модель теплового потока через стенки кирпичного дымохода, поперечное сечение которого показано на рисунке 7. Размеры указаны в метрах.

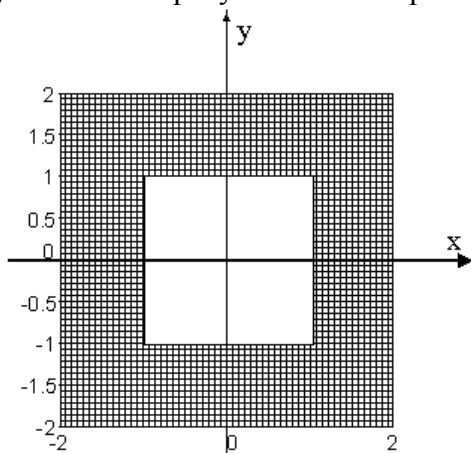


Рисунок 7 – Поперечное сечение дымохода

Считаем, что длина дымохода (принимаем 20 м) существенно больше его поперечных размеров. По причине симметрии дымохода будем моделировать только часть, расположенную в первой четверти координатной плоскости.



### Пошаговая инструкция

**1 Создать новую модель.** Меню «File» > New». В открывшемся окне из выпадающего списка выбрать пункт Heat Flow Problem.

**2 Выбор типа модели.** Меню «Problem». В окне «Problem Definition» выполнить настройки:

- тип модели («Problem Type»): плоская (planar), осесимметричная (axisymetric);
- линейные единицы измерения («Lengh Units»);
- толщина модели («Depth»).

Выберите опции как на рисунке 8.

**3 Создание модели.** Используя инструменты для рисования (кнопки  и  см. соответствующий пункт в магнитном расчете) разместите узловые точки по координатам (0, 1), (1, 0), (1, 1), (0, 2), (2, 0), (2, 2) и соедините их отрезками.

**4 Вставка материала в модель.** Меню «Properties» > «Materials Library», перетащите из

левой части окна «Materials Library» в правую материалы кирпич (Brick, Common). Нажмите ОК. При необходимости можно редактировать свойства материала, для этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на выбранном материале (или правой кнопкой мыши и выбрать в контекстном меню пункт «Modify Material»), при этом появится окно, показанное на рисунке 9. В этом окне можно задать коэффициент теплопроводности (Thermal Conductivity), объемную теплоемкость (Volumetric Heat Capacity), объемное тепловыделение (Volumetric Heat Generation). Коэффициент теплопроводности можно задать в том числе и для анизотропных материалов, таких, как дерево, по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. Объемное тепловыделение может понадобиться для моделирования таких объектов, как обмотка электрической машины или электромагнита. В данном примере ничего менять не нужно. Закрываем окно «Block Property» и нажимаем ОК в окне «Materials Library».

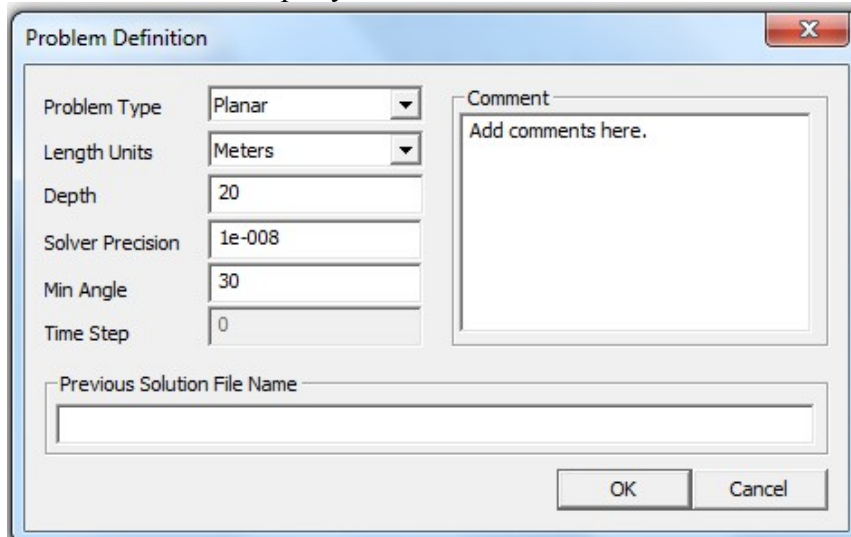


Рисунок 8 – Окно «Problem Definition»

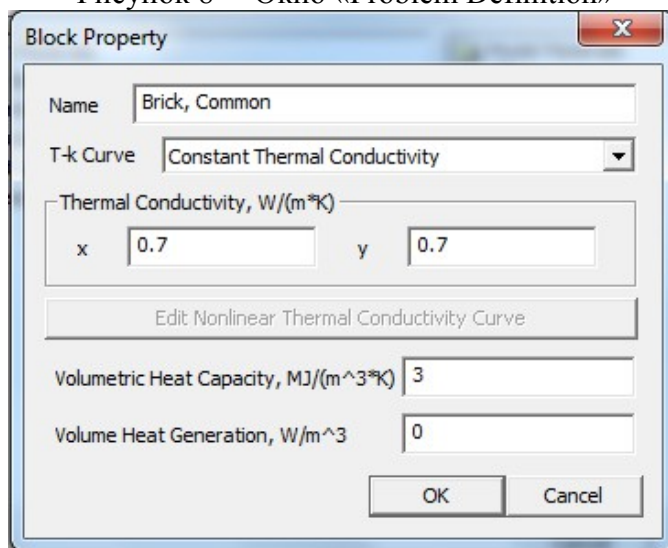









Рисунок 9 – Окно свойства блока

**5 Связать метки блоков со свойствами.** Выберем на панели инструментов «Block Labels» (кнопка ) и разместим метку на области из кирпича. Щелкнем правой клавишей мыши на метке и нажмем пробел. В появившемся окне «Properties for Selected Block». В поле «Block Type» из выпадающего списка (этот список формируется на шаге 4) выбрать материал. Отмените «Let Triangle choose Mesh Size» и установите шаг сетки («Mesh Size») равным 0,05 м. Нажмите ОК.

**6 Создание граничных условий.** Меню «Properties» > «Boundary». В открывшемся окне нажмите кнопку «Add Property». В окне «Boundary Property» в поле «Name» напишите in, в поле «BC Type» выберите «Convection» и задайте значения коэффициента теплоотдачи  $h$  и температуры среды (жидкости, омывающей поверхность)  $T_0$ . Для данного примера  $h = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  и  $T_0 = 800 \text{ К}$  (параметры газа, движущегося по дымоходу). Нажмите ОК. В окне «Property Definition» снова нажмите кнопку «Add Property». В окне «Boundary Property» в поле «Name» напишите out, в поле «BC Type» выберите «Convection» и задайте значения  $h = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  и  $T_0 = 300 \text{ К}$  (параметры наружного воздуха, омывающего дымоход снаружи). Нажмите ОК в окнах «Boundary Property» и «Property Definition».

**7 Свяжем граничные условия с геометрическим описанием модели.** Поверхность, омываемая отходящими газами, образована отрезками с координатами концов (0, 1), (1, 1), (1, 0). Поверхность омываемая наружным воздухом образована отрезками с координатами концов (0, 2), (2, 2), (2, 0). Чтобы связать отрезок с граничными условиями, необходимо на панели инструментов выбрать инструмент  и правой кнопкой мыши выбрать, например, отрезок с координатами (0, 1), (1, 1). Нажать пробел и в открывшемся окне «Segment Properties» выбрать в поле «Boundary» из выпадающего списка (формируется при создании граничных условий) выбрать граничные условия с именем in. Аналогично связать остальные отрезки с соответствующими граничными условиями.

**8 Генерация сетки и запуск моделирования.** Нажмите кнопку . В результате будет сгенерирована треугольная сетка конечно-элементной модели. Появится окно с описанием количества узлов модели. Нажимаем ОК. Теперь нажмите кнопку с «кривым стартером»  для расчета. На экране появится окно, отображающее процесс расчета. При большом количестве узлов это может занять довольно много времени.

**9 Вывод результатов расчета.** Нажмите кнопку . Откроется окно с результатами расчета (post-processor window), которое показано на рисунке 10. Здесь мы видим изотермы. Параметры отображения результатов мы можем изменить, нажав кнопки  и . Мы можем вывести температуру (Temperature), плотность теплового потока (Heat Flux Density), температурный градиент (Temp. Gradient).

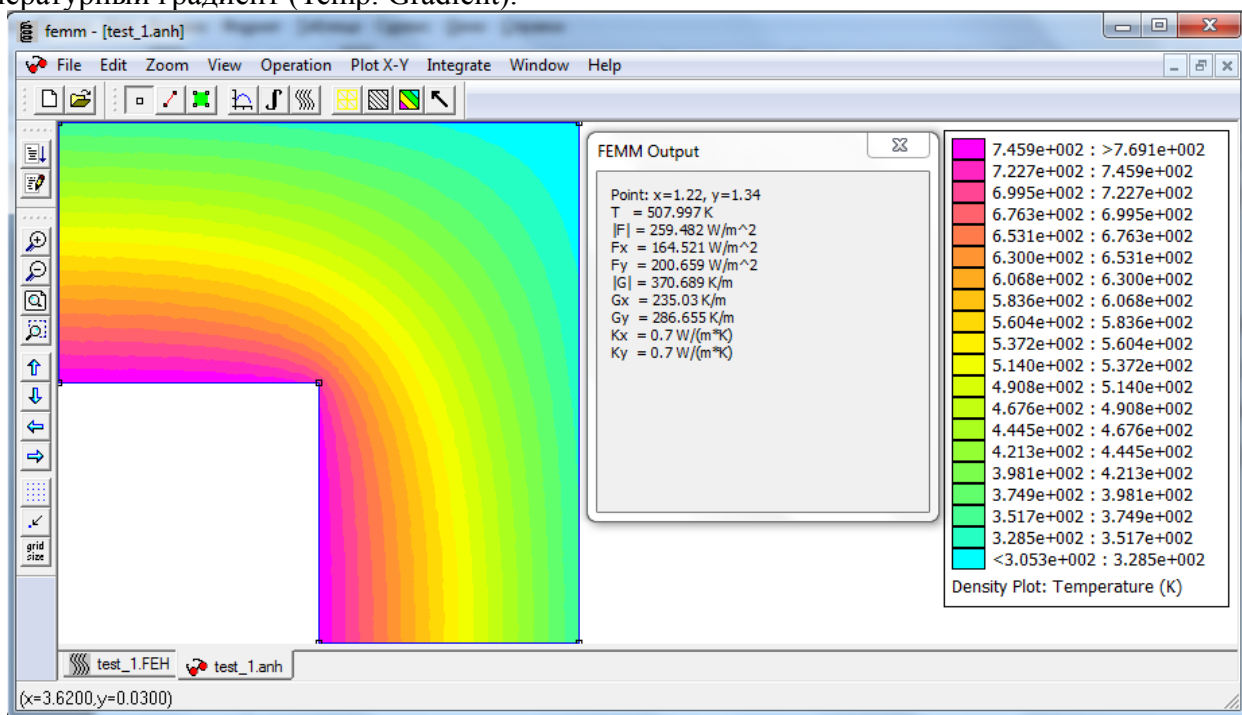



Рисунок 10 – Окно с результатами расчета



Для просмотра параметров в произвольной точке необходимо открыть окно Output (меню «View» > «Output window») и выбрать инструмент точка (point) . При щелчках левой кнопкой мыши на области моделирования в окне «FEMM Output» будут отображаться рассчитанные параметры для выбранной точки.

Более подробное описание программы FEMM на английском языке можно скачать на страничке: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>