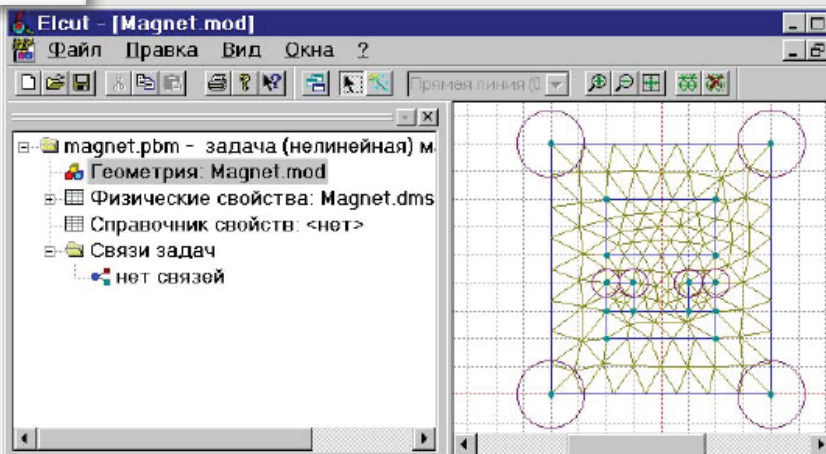
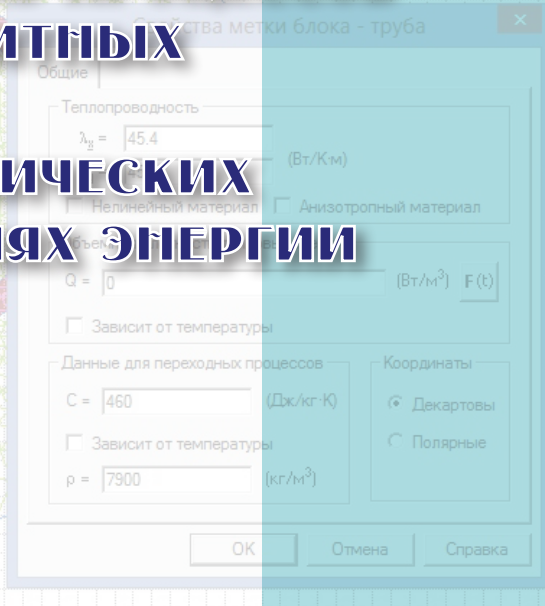
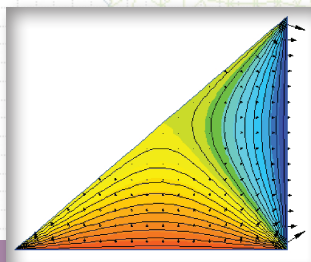


Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт энергетики и электротехники
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВАХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ

Практикум



© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский
государственный университет», 2015

ISBN 978-5-8259-0878-6

УДК 681.5
ББК 32.965

Рецензенты:

заслуженный работник высшей школы РФ, д-р пед. наук,
канд. техн. наук, профессор Поволжского государственного
университета сервиса *Н.П. Бахарев*;
канд. техн. наук, профессор Тольяттинского государственного
университета *В.В. Ермаков*.

Научный редактор канд. техн. наук *С.А. Пионтковская*.

Анализ и синтез процессов в электромагнитных устройствах и электромеханических преобразователях энергии : практикум / сост. Н.А. Калинина, А.А. Северин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 оптический диск.

В практикуме изложена обобщенная методика решения полевых задач и моделирования тепловых и электромагнитных полей в электромагнитных и электромеханических преобразователях энергии с помощью программных средств ELCUT. Приведены краткие теоретические сведения по решению полевой задачи и дана пошаговая инструкция для её решения в ELCUT.

Предназначен для студентов направления подготовки высшего профессионального образования 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» очной формы обучения, а также может быть использован студентами, обучающимися по программам магистратуры и бакалавриата других технических направлений подготовки.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Reader.



Редактор *Г.В. Данилова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Свойства метки блока - труба

Общие

Теплопроводность

$\lambda_x =$ (Вт/Км)

$\lambda_y =$

Нелинейный материал Анизотропный материал

Объемная плотность тепловыделения

Q = (Вт/м³) F(t)

Зависит от температуры

Данные для переходных процессов

C = (Дж/кг·К)

Зависит от температуры

$\rho =$ (кг/м³)

Координаты

Декартовы

Полярные

OK

Отмена

Справка

Дата подписания к использованию 19.05.2015.

Объем издания 9,4 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-30-14.

Издательство Тольяттинского
государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14
тел. 8(8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение.....	5
1. ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПОЛЕВОЙ ЗАДАЧИ	8
1.1. Главное окно программы	8
1.2. Основные этапы решения полевой задачи в ELCUT	9
1.3. Пошаговая инструкция по решению полевой задачи в ELCUT (на примере магнитостатической задачи)	10
1.4. Решение связанных задач	29
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ	32
Практическая работа 1. Построение геометрии	32
Практическая работа 2. Простановка меток, приложение нагрузок, построение сетки	46
Практическая работа 3. Решение задач теплопроводности	55
Практическая работа 4. Проведение расчета и анализ результатов	58
Варианты заданий	71
Примеры выполнения заданий.....	73
Библиографический список.....	78

Введение

Практикум предназначен для проведения практических занятий по дисциплине «Анализ и синтез процессов в электромагнитных устройствах и электромеханических преобразователях энергии».

Целью изучения практикума по дисциплине «Анализ и синтез процессов в электромагнитных устройствах и электромеханических преобразователях энергии» является усвоение и использование теоретических и прикладных положений гидравлики, аэродинамики и теории теплообмена при проектировании систем охлаждения электрических машин, в том числе трансформаторов, и формировании их термического состояния.

Задачи, решаемые при изучении практикума:

- формирование представлений об аэродинамике и теории теплообмена в электрических машинах;
- формирование знаний о типах систем охлаждения и области их применения, теплофизических свойствах используемых материалов и охлаждающих сред;
- формирование умений производить выбор и расчет систем охлаждения электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей;
- формирование общепрофессиональных, проектно-конструкторских, производственно-технических, научно-исследовательских компетенций.

В результате изучения практикума должны сформироваться следующие компетенции:

- способность использовать углубленные теоретические и практические знания, которые находятся на передовом рубеже науки и техники, в области профессиональной деятельности;
- способность анализировать естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности;
- способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы);
- готовность использовать современные и перспективные компьютерные и информационные технологии;

- способность определять эффективные производственно-технологические режимы работы объектов электроэнергетики и электротехники;
- готовность к работе по одному из конкретных профилей;
- готовность использовать современные достижения науки и передовой технологии в научно-исследовательских работах;
- готовность составлять практические рекомендации по использованию результатов научных исследований;
- способность оценивать инновационные качества новой продукции;
- готовность проводить экспертизы предлагаемых проектно-конструкторских решений и новых технологических решений.

В результате изучения дисциплины студент должен

знать:

- основы гидравлики, аэродинамики и теории теплообмена в электромагнитных устройствах и электромеханических преобразователях энергии;
- типы систем охлаждения, области их применения и возможности;
- теплофизические свойства используемых материалов и охлаждающих сред;
- задачи вентиляционных и тепловых расчетов и методы их решения;

уметь:

- обосновывать целесообразность выбора системы охлаждения и конструкций её элементов;
- выполнять расчет вентиляторов электрических машин;
- выполнять тепловые расчеты;
- решать задачи, связанные с определением температурных полей;

владеть:

- современными измерительными и компьютерными системами и технологиями;
- навыками оформления, представления и защиты результатов решения задач, связанных с функционированием систем охлаждения и формированием термического состояния электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии.

ELCUT – это компьютерная программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Компьютерное моделирование и численный

анализ в промышленности позволяют избежать дорогостоящих и длительных натурных испытаний, ускоряют, дополняют и иллюстрируют процесс проектирования и разработки, способствуют развитию инженерной интуиции.

Модули ELCUT позволяют проводить анализ физических полей и получать решение связанных междисциплинарных задач в таких видах анализа:

- магнитное поле переменных токов;
- магнитные поля постоянных токов и/или постоянных магнитов;
- нестационарное магнитное поле;
- электростатическое поле;
- электрическое поле постоянных токов;
- электрическое поле переменных токов;
- нестационарное электрическое поле;
- стационарное и нестационарное температурные поля;
- механические напряжения и упругие деформации.

Модуль «Теплопередача» предназначен для расчёта переходного и установившегося температурных полей с учётом конвективного и радиационного теплообмена. Используется для анализа нагрева и проектирования систем охлаждения.

Работу с ELCUT можно начать практически сразу, не отвлекаясь на изучение математических основ вычислительных алгоритмов и особенностей их реализации.

Практикум включает:

- изложение теоретического материала, необходимого для решения практических задач по расчету двумерных тепловых полей в электромеханических преобразователях энергии с различной конфигурацией магнитопровода с использованием программы ELCUT;
- методические указания к выполнению практических работ, предназначенных для освоения этой программы;
- варианты индивидуальных заданий;
- примеры моделирования тепловых полей произвольной модели и двигателя постоянного тока.

Практикум может быть полезным студентам, обучающимся по программе магистратуры, и аспирантам при проведении научных исследований.

1. ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПОЛЕВОЙ ЗАДАЧИ

Решение полевой задачи сводится к нескольким последовательным шагам.

1. Выбор типа решаемой задачи (электростатика, магнитостатика и т. п.).

2. Выбор класса задачи (плоская или осесимметричная). Осесимметричная задача выбирается, если моделируемый объект является телом вращения (цилиндрическая заготовка, труба, соленоид и т. п.). При этом, решая задачу в двумерной постановке, решение фактически находят для трехмерной задачи.

3. Создание геометрической модели (своего рода чертежа объекта).

4. Задание свойств материалов (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность и т. д.).

5. Задание нагрузок (величины токов, мощности тепловыделения и т. д.).

6. Задание граничных условий (величины потенциалов поля на границах расчетной области, значения температур на границах и т. д.).

7. Построение сетки конечных элементов.

8. Решение задачи.

9. Обработка результатов решения (построение цветовых карт, графиков изменения переменной по какому-либо контуру, расчет интегральных значений и т. п.).

Перечисленные шаги являются общими для решения полевых задач и мало отличаются при использовании разных программных средств.

1.1. Главное окно программы

Главное окно программы на этапе создания модели представлено на рис. 1. Окно содержит заголовок с названием программы и именем файла модели, меню со списком команд для управления работой программы, панель инструментов (кнопки, соответствующие наиболее часто используемым командам меню). Ниже панели

инструментов расположены два окна. В левом окне отображается структура задачи, а в правом – геометрия решаемой задачи (после решения задачи в правом окне выводятся результаты расчета). В нижней части основного окна находится строка состояния, в которой отображаются сообщения программы.

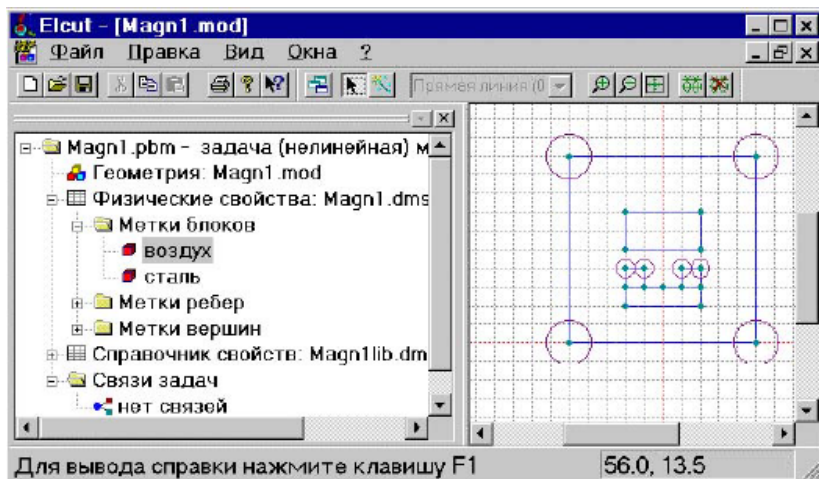


Рис. 1. Окно программы ELCUT на этапе создания модели

1.2. Основные этапы решения полевой задачи в ELCUT

Основные этапы решения полевой задачи следующие.

1. Создание новой, пустой задачи (Файл/ Создать/ Задача ELCUT).
2. Ввод параметров задачи (Правка/ Свойства).
3. Задание геометрии, меток объектов и построение сетки (Правка/ Геометрическая модель).
4. Ввод данных о материалах, нагрузках и граничных условиях (Правка/ Физические свойства).
5. Решение задачи (Правка/ Решить задачу).
6. Просмотр результатов и вычисление интегральных величин (Правка/ Анализ результатов).

1.3. Пошаговая инструкция по решению полевой задачи в ELCUT (на примере магнитоэстатической задачи)

Геометрическая модель рассматриваемой задачи (постоянный магнит) приведена на рис. 2. Все размеры указаны в миллиметрах.

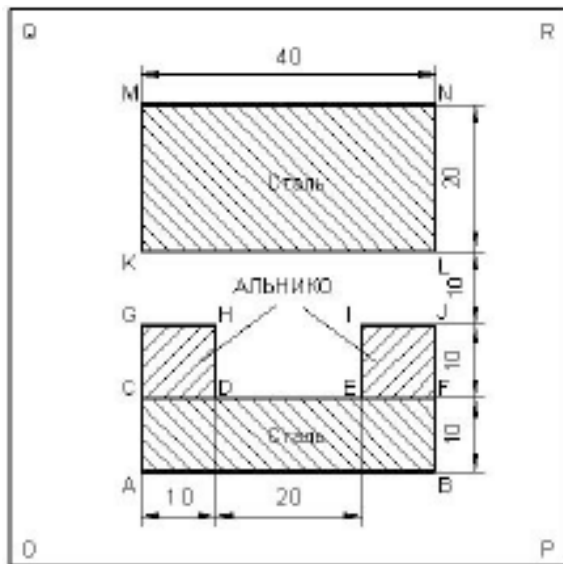


Рис. 2. Расчетная задача

Создание новой задачи

1. Выберите команду «Создать» из меню файла. Появится окно для выбора типа документа ELCUT, который необходимо создать (рис. 3).

2. Щелкните мышью строку задача ELCUT и затем нажмите ОК. Появится новое окно, приглашающее ввести имя и расположение новой задачи (рис. 4). При необходимости перейдите в нужную папку в поле «Создать» в папке или используйте кнопку «Обзор».

3. В поле «Имя файла» задачи введите имя файла (например, Magnet).

4. Нажмите «Далее».

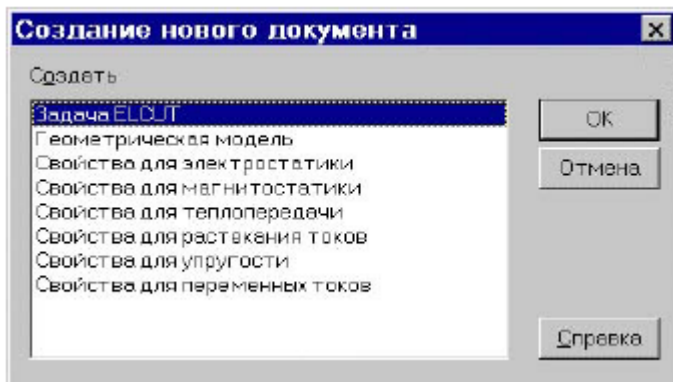


Рис. 3. Окно выбора типа документа ELCUT

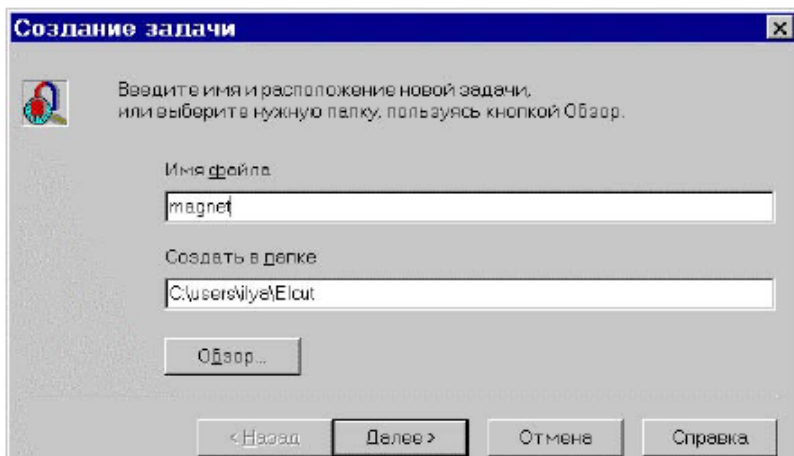


Рис. 4. Окно выбора расположения задачи

Выбор типа задачи и класса модели

1. В списке «Тип» задачи выберите «Магнитостатика» (рис. 5).
2. Выберите класс модели «Плоская». Имеет смысл принять предложенные системой имена файлов модели (Magnet.mod) и физических свойств (Magnet.dms).
3. Нажмите кнопку «Далее».

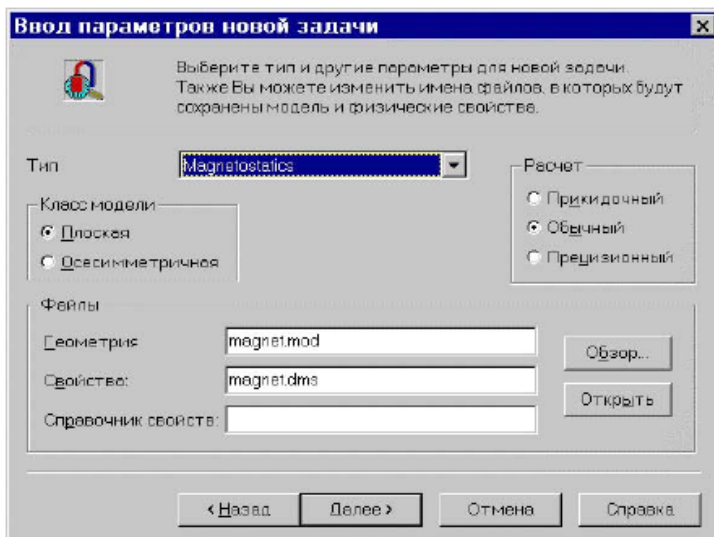


Рис. 5. Окно ввода параметров задачи

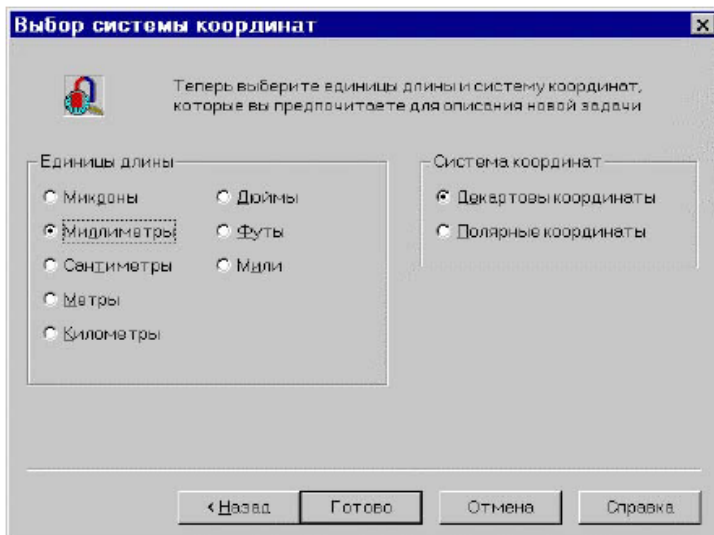


Рис. 6. Окно выбора системы координат

Выбор единиц измерения длины и системы координат

1. Выберите «Миллиметры» (рис. 6).
2. Нажмите «Готово», чтобы создать новую задачу.
3. ELCUT откроет новое окно для задачи Magnet.pbm. В меню «Файл» выберите команду «Сохранить», чтобы сохранить описание задачи в файле.

Начало работы с моделью

1. В меню «Правка» выберите «Геометрическая модель» или дважды щелкните элемент Magnet.mod в дереве задачи, или выберите «Открыть» в контекстном меню, возникающем при щелчке правой кнопкой мыши на этом элементе дерева.

2. Подтвердите создание новой модели. Откроется окно работы с моделью. Для большего удобства его можно развернуть на весь экран.

Создание геометрических элементов

Для начала необходимо принять решение относительно размеров расчетной области. Поскольку данная задача физически не ограничена, следует окружить магнитную систему слоем воздуха достаточной протяженности, чтобы исключить влияние границ. Предположим, что достаточным будет воздушный слой, в три раза больший, чем зазор в магнитном сердечнике. Тогда вся расчетная область уместится в прямоугольнике 100×100 мм.

Первое, что нужно сделать в окне работы с моделью, — указать размеры окна, в котором целиком поместится расчетная область. Поскольку задача обладает симметрией относительно вертикальной оси, удобно расположить начало координат на оси симметрии. Тогда область уместится в прямоугольнике $(-50 \leq X \leq 50, -50 \leq Y \leq 100)$. Чтобы этот прямоугольник занял окно модели целиком, необходимо выполнить следующие действия.

1. Нажмите кнопку «Крупнее» на панели инструментов.
2. Переместите указатель мыши в точку $(-50, 0)$, следя за координатами в левом нижнем углу окна приложения ELCUT. Обязательно попасть точно в указанную точку, достаточно щелкнуть мышью поблизости от точки левее и ниже нее.
3. Щелкните левой кнопкой мыши и перетащите ее в точку $(50, 100)$.

Окно модели отразит сделанное масштабирование. Нажмите кнопку «Крупнее» еще раз, чтобы отменить режим масштабирования.

Чтобы упростить создание объектов, воспользуемся «Сеткой привязки». Заметим, что координаты всех вершин нашей модели, как вертикальные, так и горизонтальные, кратны 10 мм. Чтобы установить шаг сетки привязки, равный 10 мм, необходимо следующее.

1. В меню «Правка» или в контекстном меню выберите «Сетка привязки», в результате чего появится окно диалога (рис. 7).

2. В поле «По горизонтали» введите 10. Поскольку флажок «Не квадратные ячейки» выключен, такое же значение появится в поле «По вертикали».

3. Позицию начальной точки (0, 0) в большинстве случаев менять не требуется. Нажмите кнопку ОК, чтобы завершить диалог (рис. 7).

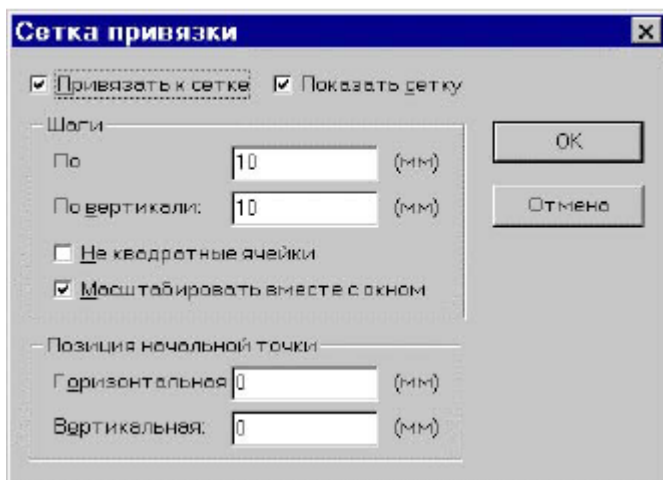


Рис. 7. Окно диалога для изменения сетки привязки

Теперь можно заняться описанием собственно геометрии. Чтобы создать рёбра, образующие границы модели (рис. 8), выполните следующее.

1. Нажмите клавишу INS (или команду «Режим вставки» в меню «Правка», или команду «Вставка вершин/ рёбер» в контекстном меню, или соответствующую кнопку на панели инструментов), чтобы перевести окно модели в режим вставки.

2. Щелкните мышью в точке $(-20, 20)$ и перетащите ее в точку $(20, 20)$, чтобы создать ребро AB. Ребро появится на экране сразу, как только вы отпустите кнопку мыши.

3. Повторите шаг 2 в точке $(-20, 30; 20, 30)$ для ребра CF, $(-20, 40; -10, 40)$ для ребра GH, $(10, 40; 20, 40)$ для IJ, $(-20, 20; -20, 40)$ для AG, $(-10, 30; -10, 40)$ для DH и так далее. Безразлично, в каком порядке вы создаете рёбра, также не имеет значения направление рёбер. Если точка, в которую вы хотите щелкнуть, находится за пределами экрана, используйте полосу прокрутки. Не беспокойтесь о возможных ошибках, ненужные вершины и ребра можно удалить позже. Не забудьте создать ребра OPRQ, окружающие модель.

4. Нажмите клавишу INS еще раз, чтобы завершить режим вставки.

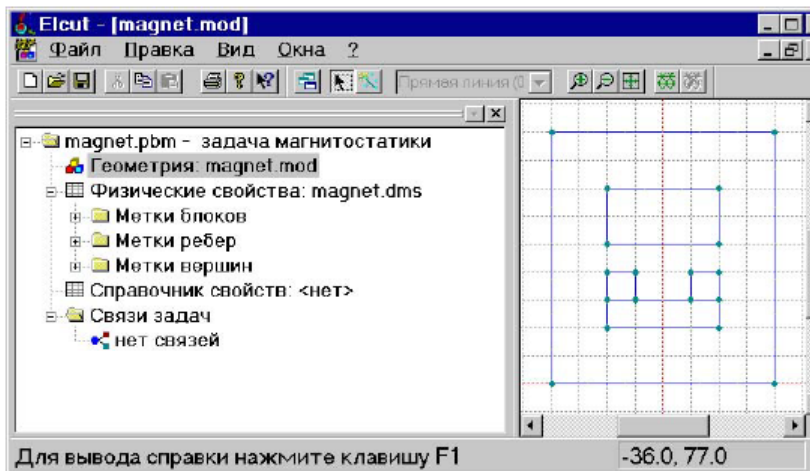


Рис. 8. Окно программы на этапе задания геометрии модели

Удалите лишние рёбра или вершины.

1. Удерживая клавишу CTRL, выделите щелчком мыши удаляемые объекты. Если вы выделили ненужный объект, щелкните его мышью еще раз, чтобы снять выделение. Отпустите клавишу CTRL.

2. Нажмите клавишу DEL (или выберите команду «Удалить выделенное» из меню «Правка» или контекстного меню). Удаляемые объекты немедленно исчезнут с экрана.

Задание свойств материалов

В ELCUT для ввода свойств материалов необходимо сначала присвоить метки геометрическим областям, которые выполнены из разных материалов, а затем для созданных меток указать свойства материалов. Таким образом, геометрическая область модели, соответствующая данному материалу, оказывается связанной с окном ввода свойств материала с помощью метки этого материала. Аналогичный принцип используется и для задания граничных условий.

Рассматриваемая задача содержит четыре материала с различными свойствами: воздух, сталь и два постоянных магнита с различным направлением вектора намагничивания. Выберем мнемонические метки «Сталь», АЛНИКО+ и АЛНИКО- для соответствующих блоков (символами «+» и «-» в названии меток материалов магнитов условно покажем направление коэрцитивной силы) (рис. 9, 10).

Для присвоения меток блокам сделайте следующее.

1. Дважды щелкните мышью прямоугольник CDHG. Блок станет выделенным и появится диалоговое окно «Свойства выделенных объектов» (рис. 9).

2. В поле «Метка» введите АЛНИКО+.

3. Нажмите ОК, чтобы завершить диалог.

4. Повторите эти действия для присвоения метки АЛНИКО- прямоугольнику CDJI и метки «Воздух» прямоугольнику OPRQ.

5. Щелкните мышью прямоугольник ABFC и затем, удерживая клавишу CTRL, щелкните прямоугольник KLMN, чтобы выделить оба блока одновременно.

6. Щелкните правой кнопкой мыши в пределах выделенного, чтобы вывести контекстное меню, не изменяя выделения объектов.

7. В контекстном меню выберите «Свойства» и присвойте метку «Сталь» обоим блокам.

8. Нажмите ОК, чтобы завершить диалог.

Метки блоков, появившиеся в окне задачи, содержат вопросительный знак, что означает, что эти метки упомянуты в модели, но их свойства еще не определены. Теперь можно задать физические свойства для этих меток (свойства материалов).

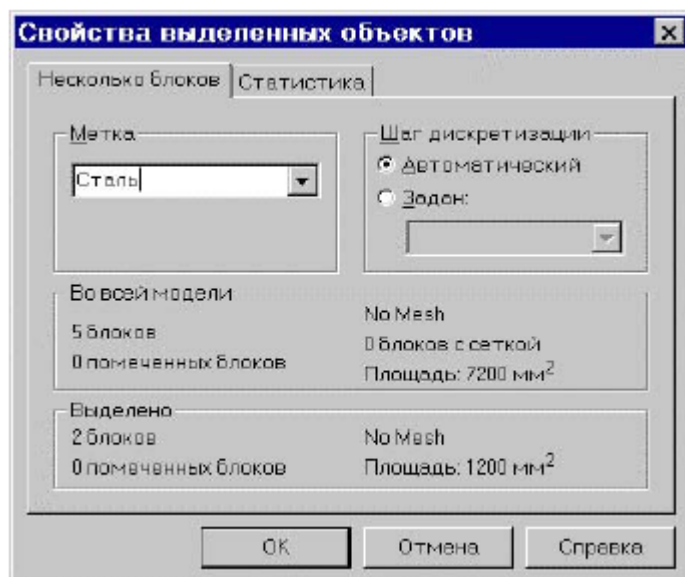


Рис. 9. Окно «Свойства...» на этапе присвоения меток блокам

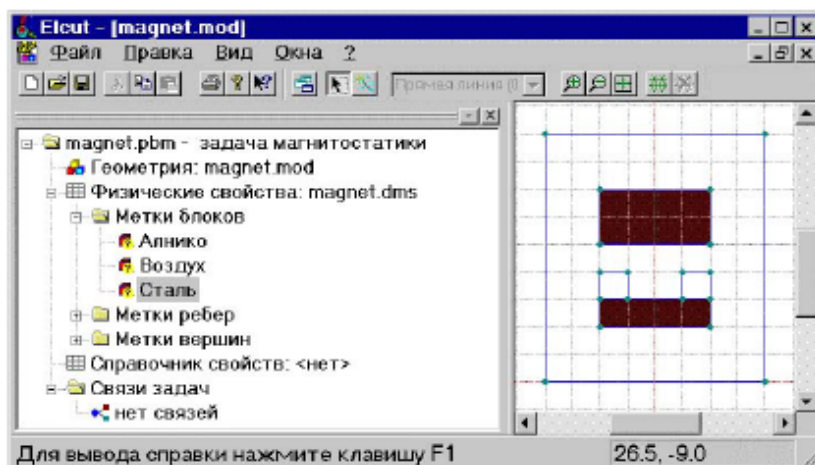


Рис. 10. Окно программы на этапе присвоения меток блокам

Введите свойства для метки блока «Воздух».

1. Дважды щелкните на метке «Воздух» или выберите «Свойства» в её контекстном меню (рис. 11).
2. Введите 1 в любое поле для компонентов тензора магнитной проницаемости.
3. Нажмите ОК.

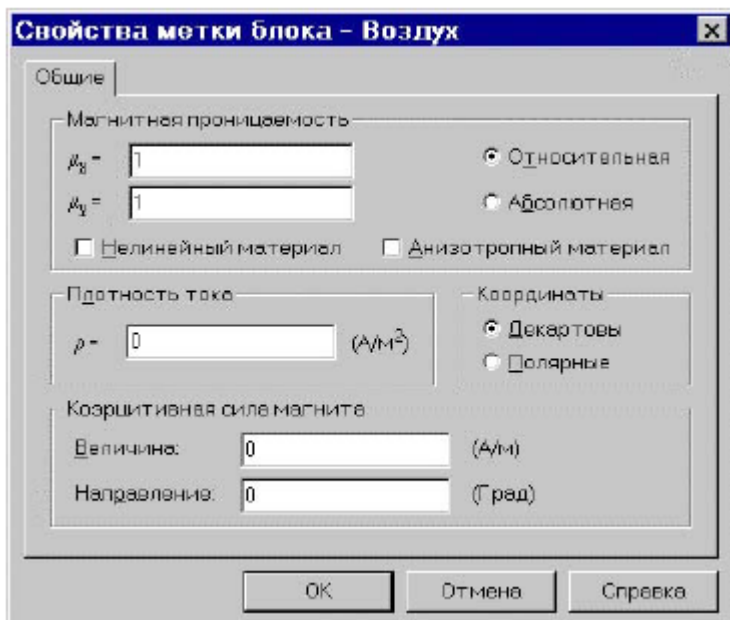


Рис. 11. Окно «Свойства...» на этапе задания свойств блоку «Воздух»

Теперь зададим кривую намагничивания ферромагнитного материала. Начнем редактировать данные для метки блока «Сталь».

1. Дважды щелкните строку «Сталь» или выберите «Свойства» в её контекстном меню. Появится диалог ввода свойств.
2. Отметьте флаг «Нелинейный материал». Тем самым вы откроете окно работы с кривыми намагничивания (рис. 12).

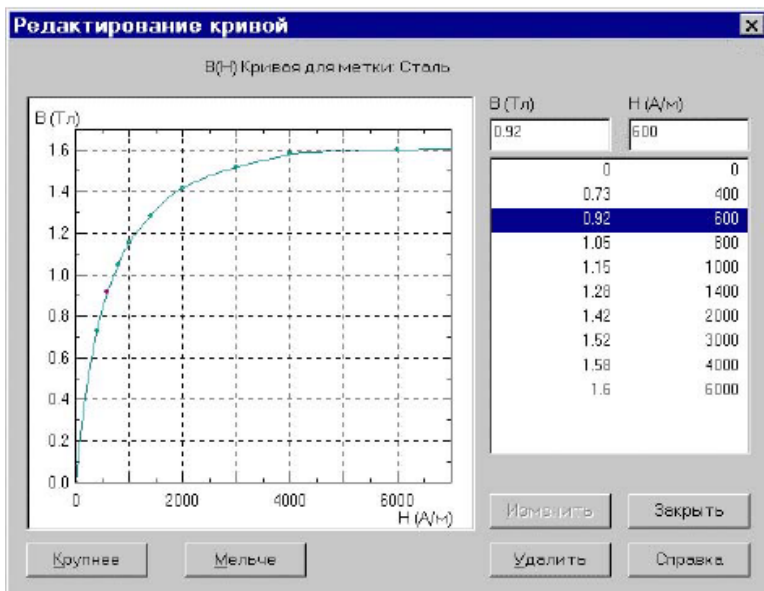


Рис. 12. Окно задания свойств нелинейных материалов

Это окно позволяет вам просто вводить значения в таблицу точек за точкой, контролируя вид кривой на графике в левом окне. Точка (0; 0), всегда присутствующая в таблице, не может быть удалена или изменена. Когда курсор находится в поле ввода значения индукции, вы можете начать вводить новые точки. Чтобы ввести первую точку кривой ($B = 0,73$ Тл, $H = 400$ А/м, см. табл. 1), сделайте следующее.

1. Введите 0,73 и нажмите клавишу ENTER. Курсор переместится в поле значения H. Введите 400 и нажмите клавишу ENTER. Новая точка добавится в таблицу и немедленно высветится на графике. Курсор опять переместится в поле B.

2. Повторите эти действия для каждой из точек таблицы. Вводить точки в таблицу можно в любом порядке.

Таблица 1

Кривая намагничивания стали

H (А/м)	400	600	800	1000	1400	2000	3000	4000	6000
B (Тл)	0,73	0,92	1,05	1,15	1,28	1,42	1,52	1,58	1,60

В случае опечатки неверно введенная точка, как правило, вызовет аномальное поведение кривой на графике, благодаря чему легко может быть замечена. Вы можете выделить эту точку на графике или в таблице и затем удалить ее или исправить значения. Когда вы закончите ввод точек в таблицу и кривая будет похожа на классическую кривую намагничивания, нажмите кнопку «Закрыть» для завершения работы с кривой и возврата в окно свойств метки блока. Поскольку мы больше не хотим вводить данные для метки блока «Сталь», нажмите ОК, завершая ввод данных для метки блока.

Ввод свойств для постоянного магнита немного более сложен. Кроме кривой размагничивания следует задать направление намагничивания, т. е. компоненты вектора коэрцитивной силы. Введем характеристику размагничивания для метки блока АЛНИКО+ (табл. 2).

1. Дважды щелкните метку АЛНИКО+ или выберите «Свойства» из ее контекстного меню. Появится диалог для ввода свойств.

2. Введите 1 в любом из полей компонентов тензора намагничивания. Это условное значение, единственная цель которого – указать программе, что свойства для этой метки не пусты, с тем чтобы остальные поля ввода стали доступны.

3. В поле «Величина» для коэрцитивной силы введите 147218.

4. В поле «Направление» введите 90. Направление отсчитывается от горизонтальной оси против часовой стрелки.

5. Включите флажок «Нелинейный материал». Этим вы откроете окно кривой размагничивания.

Заметим, что точка с координатами (-147218, 0) уже включена в таблицу, и в окне кривых ее нельзя удалить или изменить. Это и есть первая точка таблицы. Теперь мы можем продолжить ввод остальных точек характеристики размагничивания. Когда это будет сделано, нажмите кнопку «Закрыть», завершая редактирование кривой и возвращаясь в окно ввода свойств. Затем нажмите кнопку «ОК» для завершения ввода свойств метки блока АЛНИКО+.

Таблица 2

Кривая размагничивания сплава АЛНИКО

H (А/м)	-147218	-119400	-99470	-79580	-53710	-19890	0,0
B (Тл)	0,0	0,24	0,4	0,5	0,6	0,71	0,77

Вводя свойства для метки АЛНИКО-, нет необходимости повторять все эти действия. Достаточно просто скопировать свойства из метки АЛНИКО+ и изменить направление вектора коэрцитивной силы. Это делается так.

1. Выберите метку АЛНИКО+ в дереве меток.
2. В меню «Правка» или контекстном меню выберите команду «Копировать». Откройте меню еще раз и выберите «Вставить». Копия метки АЛНИКО+ под именем АЛНИКО+ (2) появится в дереве.
3. Выделите метку АЛНИКО+ (2) в дереве.
4. В меню «Правка» или в контекстном меню выберите «Переименовать». Смените имя на АЛНИКО- и нажмите ENTER.
5. Дважды щелкните АЛНИКО- или выберите «Свойства» из ее контекстного меню. Появится диалог для ввода свойств.
6. В поле «Направление» замените 90 на -90, чтобы сменить направление коэрцитивной силы на противоположное.
7. Нажмите ОК.

Задание граничных условий

Метки рёбер используются для задания граничных условий на внешних и внутренних границах области. В нашем случае мы должны задать нулевое граничное условие «Дирихле» ($A = 0$) на внешней границе области (прямоугольник OPRQ).

Чтобы присвоить метки рёбрам, выполните следующее.

1. Укажите мышью четыре ребра, которые образуют прямоугольник OPRQ, удерживая нажатой клавишу CTRL. Эти четыре выделенных ребра будут подсвечены. Если вы случайно выделили лишнюю вершину, ребро или блок, щелкните его еще раз, чтобы снять выделение.
2. Щелкните правой кнопкой мыши в пределах выделенного, чтобы вывести контекстное меню, не меняя выделения объектов.
3. В контекстном меню выберите «Свойства» и присвойте метку «Ноль» выделенным рёбрам (рис. 13, 14).
4. Нажмите ОК, чтобы завершить диалог.

Граничные условия задаются в окне редактирования меток ребер, аналогично тому, как это делается при вводе свойств материалов.

В рассматриваемой задаче величины индукции и напряженности магнитного поля за пределами расчетной области можно принять равными нулю.

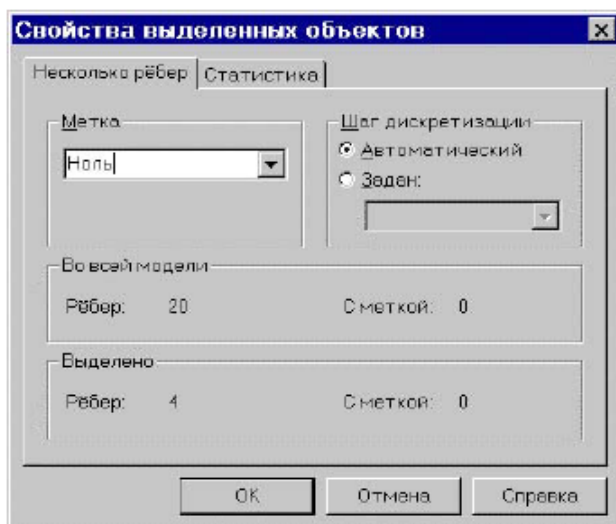


Рис. 13. Окно «Свойства...» на этапе присвоения меток ребрам

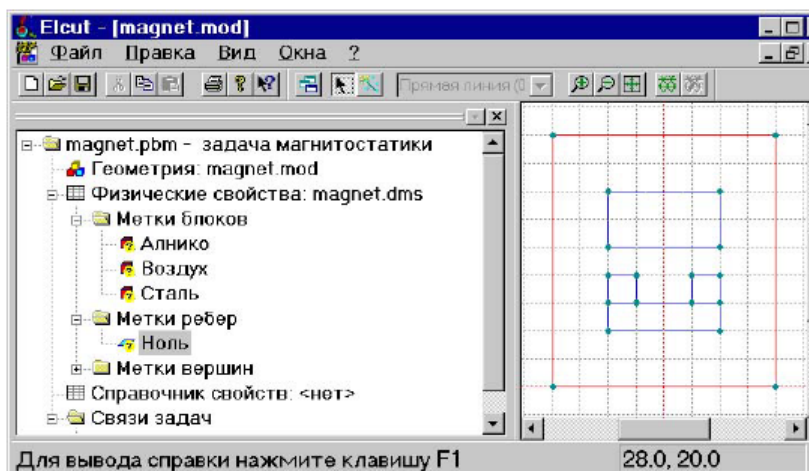


Рис. 14. Окно программы на этапе присвоения меток ребрам

Введите данные для метки «Ноль».

1. Выделите имя метки «Ноль» в ветви «Метки рёбер» и дважды щелкните её мышью или выберите «Свойства» в ее контекстном меню. Появится диалоговое окно для ввода свойств метки ребра.

2. Включите флажок «Магнитный потенциал». В полях ввода будут предложены нулевые значения (рис. 15).

3. Нажмите ОК.

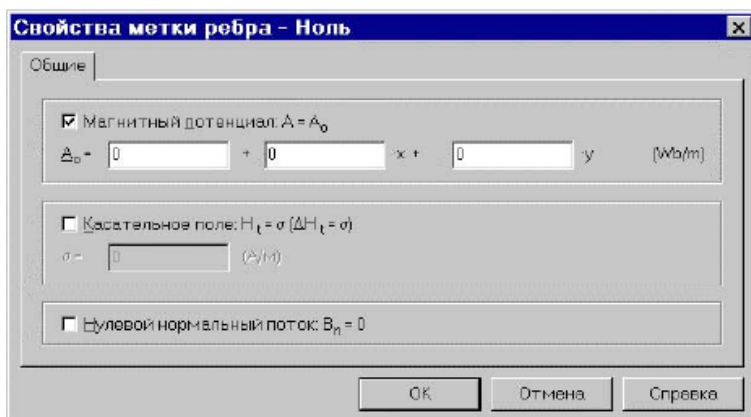


Рис. 15. Окно задания свойств ребер

Построение сетки конечных элементов

Для построения сетки конечных элементов предварительно необходимо задать шаг дискретизации (разбиения) расчетной области. Шаг дискретизации определит густоту сетки конечных элементов в различных областях модели. Можно задавать этот параметр для вершин, ребер или областей модели.

Для рассматриваемой задачи можно предположить существенную неоднородность поля вокруг магнитов, поэтому сетка тут должна быть максимальной густоты. Следовательно, мы зададим величину шага дискретизации равной 5 мм в вершинах G, H, I и J и равной 12 мм в вершинах O, P, R и Q, с тем чтобы получить сетку общим числом узлов не более 200 (данное ограничение отсутствует в профессиональной версии программы).

Задайте значения шага дискретизации.

1. Выделите вершины G, H, I и J и выберите команду «Свойства» в контекстном меню.

2. Установите переключатель «Шаг дискретизации» в положение «Ручной» и введите 5 (рис. 16).

3. Нажмите ОК для завершения диалога.

4. Повторите эти действия, чтобы присвоить шаг 12 мм вершинам O, P, R и Q.

Для построения сетки конечных элементов в меню «Правка» выберите команду «Построить сетку» и затем «Во всех блоках», чтобы построить сетку во всех блоках одновременно (рис. 17, 18).

Теперь модель готова. Чтобы сохранить её на диске, выберите команду «Сохранить» в меню «Файл».

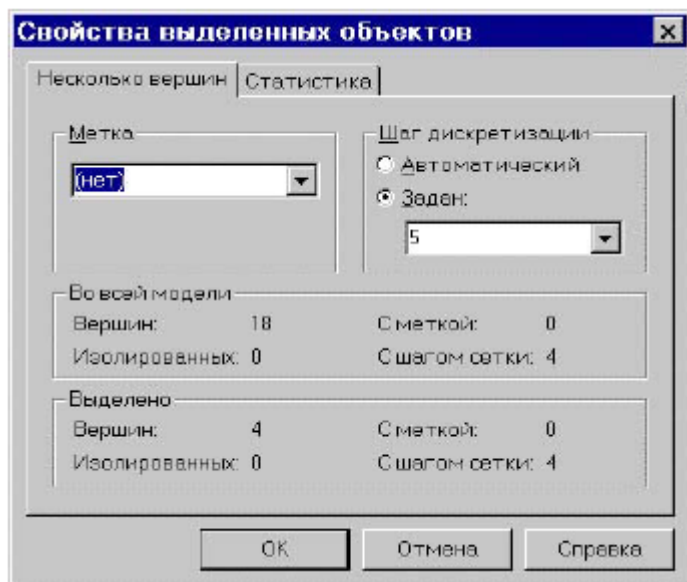


Рис. 16. Окно «Свойства...» на этапе задания шага дискретизации

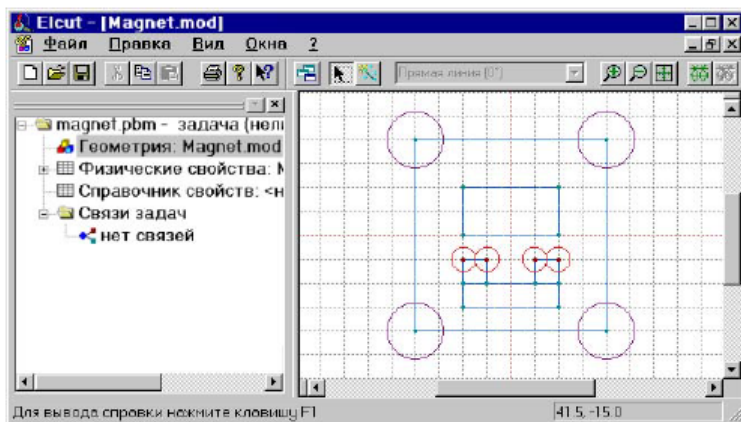


Рис. 17. Окно программы на этапе задания шага дискретизации

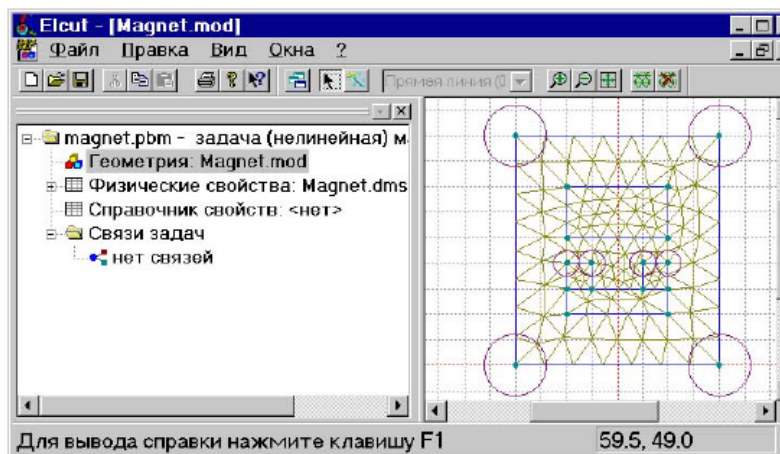


Рис. 18. Окно программы на этапе построения сетки

Решение задачи

Для решения задачи необходимо выбрать пункт меню «Правка/ Решить задачу». Если данный пункт в меню «Правка» отсутствует, необходимо выделить (однократным щелчком левой клавиши мыши) любую метку материала. После этого пункт «Решить задачу» в меню «Правка» появится. После окончания расчета в правой части основного окна будет выведена рассчитанная картина поля текущей задачи (рис. 19).

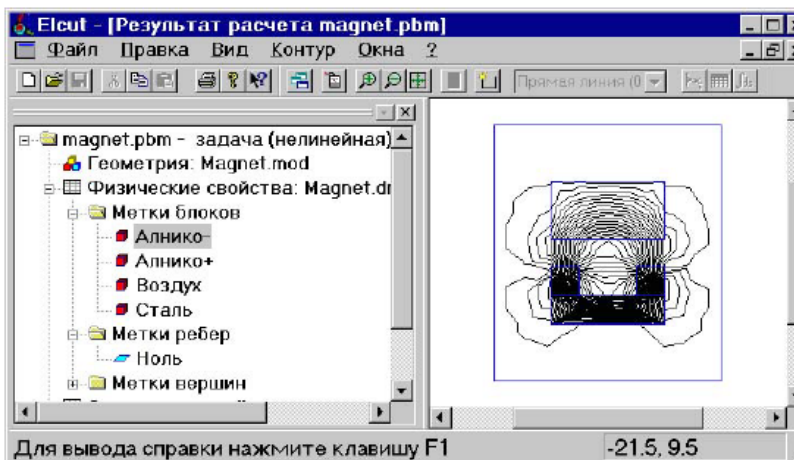


Рис. 19. Окно программы с результатами расчета

Просмотр результатов

ELCUT позволяет представить решение задачи несколькими способами:

- картины поля,
- локальные полевые значения,
- интегральные величины,
- графики,
- таблицы.

Работа с картиной поля

С помощью пункта меню «Вид/ Картина поля» изменяется способ отображения результатов расчета (рис. 20). В открывшемся окне диалога можно изменить настройки для отображения картины поля, например, изменить масштаб прорисовки силовых линий (или убрать силовые линии совсем), вывести для отображения векторное поле выбранной переменной, изменить переменную, для которой строится картина поля, и т. д. Дополнительно в данном окне можно задать максимальное и минимальное значения для выбранной переменной.

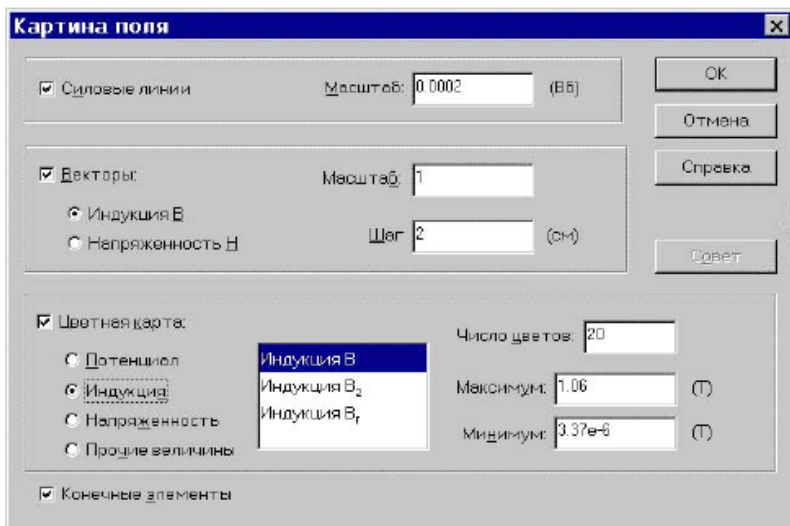


Рис. 20. Окно диалога «Картина поля»

Просмотр локальных значений поля

С помощью меню «Вид/ Локальные значения» можно определить значения физических величин, характеризующих поле, в требуемых точках (рис. 21). После выбора данного пункта меню появится дополнительное окно, в котором будут отображаться значения переменной в точке, указанной мышью на общей картине поля.

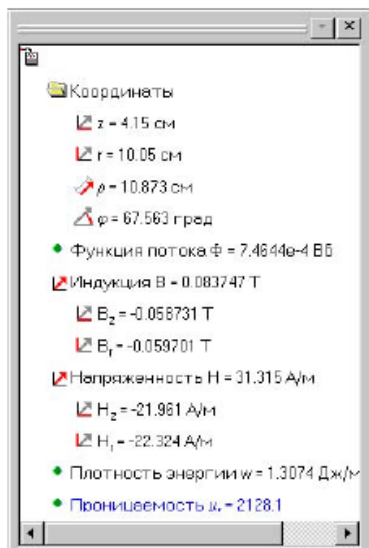


Рис. 21. Окно отображения локальных значений

Определение интегральных значений

Для расчета интегральных значений сначала необходимо построить контур, по которому будет выполняться интегрирование. Контур рисуется с помощью мыши после выбора команды меню «Контур/ Добавить». Тип рисуемой линии можно изменить с помощью панели инструментов «Панель анализа результатов». Замыкание контура можно выполнить с помощью команды «Контур/ Замкнуть».

После создания контура необходимо обратиться к пункту меню «Вид/ Интегральные значения». После выполнения данной команды откроется дополнительное окно со списком рассчитанных интегральных характеристик. Щелкнув один раз на кнопке рядом с названием параметра, можно вывести на экран его значение (рис. 22).

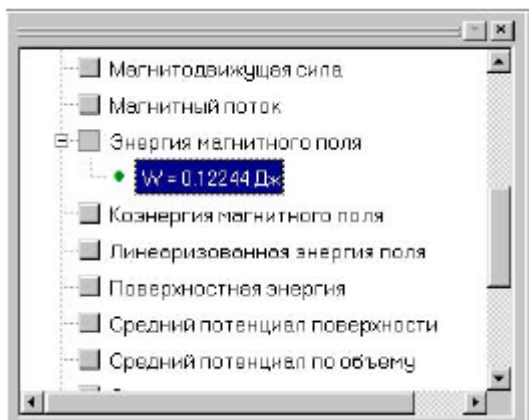


Рис. 22. Окно вычисления интегральных значений

Построение графиков

Графики распределения переменных в ELCUT строятся вдоль линии предварительно проложенного контура. Для построения графика необходимо сначала создать контур (это может быть просто отрезок прямой линии), а затем обратиться к пункту меню «Вид/ График». В результате на экран будет выведен требуемый график (рис. 23).

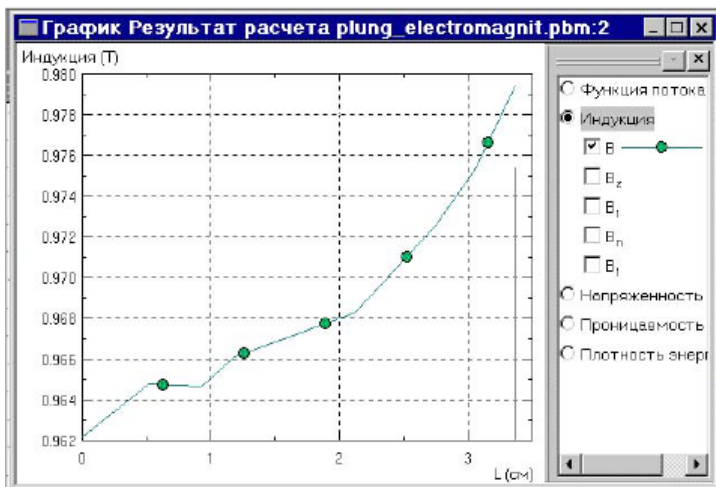


Рис. 23. Окно построения графиков

Для изменения переменной, отображаемой на графике, необходимо выполнить команду «Вид/ Кривые на графике» и выбрать требуемую переменную.

1.4. Решение связанных задач

Общие положения

ELCUT позволяет переносить источники поля (распределенные нагрузки), рассчитанные в одной задаче, в задачи другого типа. Предусмотрены следующие типы связи между задачами:

- поле температур, обусловленное тепловыми потерями в задаче растекания токов или задаче магнитного поля переменных токов;
- анализ механических напряжений с учетом рассчитанного распределения температуры;
- расчет механических напряжений, вызванных магнитными силами;
- расчет механических напряжений, вызванных электростатическими силами.

В связанной задаче, в дополнение к источникам (нагрузкам), перенесенным из другой задачи, могут быть заданы прочие источники, так же как и в обычной задаче.

Можно совместить разные типы связи в одной задаче. Например, после расчета растекания токов, электростатических и магнитных полей в разных задачах, использующих один и тот же файл геометрии модели, можно рассчитать распределение температуры, вызванное тепловыми потерями, а затем — механические напряжения, вызванные действием температурных деформаций, электростатической и магнитной силой одновременно.

ELCUT накладывает некоторые ограничения на связанные задачи:

- как задача-источник, так и целевая задача должны использовать один и тот же файл геометрии модели;
- обе задачи должны использовать одну и ту же систему координат (декартову или цилиндрическую);
- к моменту решения целевой задачи задача-источник должна быть решена. Несмотря на требование единого файла модели для обеих задач, их расчетная область может не совпадать, поскольку часть подобластей, используемая в одной задаче, может быть исключена из рассмотрения в другой.

Создание и решение связанной задачи

1. Создать и отладить основную задачу (задачу-источник), результаты расчета из которой будут передаваться в подчиненную задачу в качестве исходных данных.

2. Создать подчиненную задачу. Файл геометрии подчиненной задачи должен быть тем же, что и для основной задачи.

3. В подчиненной задаче установить курсор на имени задачи и открыть окно диалога «Свойства задачи» (Правка/ Свойства).

4. Перейти на вкладку «Связь задач».

5. В панели «Редактируемая ссылка» выбрать нужный тип передаваемых в подчиненную задачу данных и указать имя задачи (для этого можно воспользоваться кнопкой «Обзор»).

6. Нажать кнопку «Добавить».

7. Закрыть окно диалога с помощью кнопки «ОК» (рис. 24, 25).

После создания связи в папке «Связи задач» будут указаны передаваемый параметр и имя файла основной задачи.

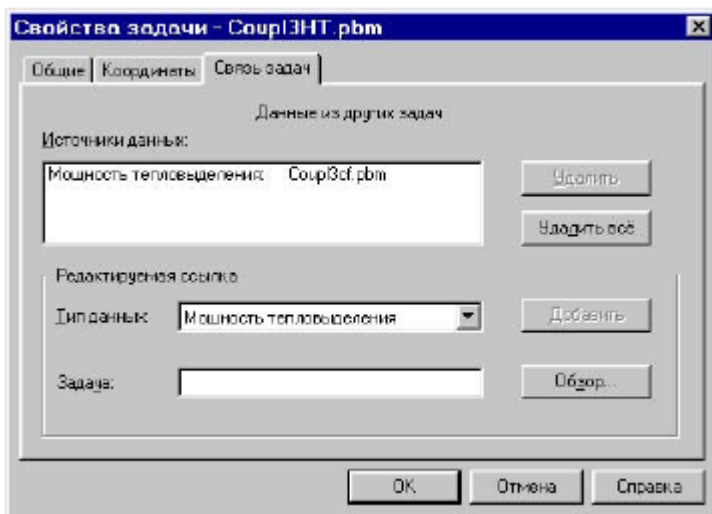


Рис. 24. Окно редактирования свойств задачи (вкладка «Связь задач»)

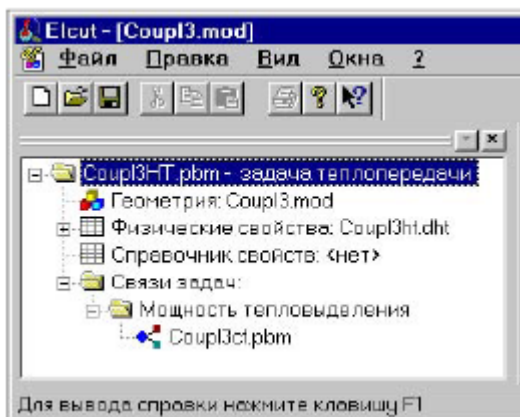


Рис. 25. Окно структуры подчиненной задачи после осуществления связи задач

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Практическая работа 1 Построение геометрии

Цель работы – ознакомиться с правилами и инструментами создания геометрических моделей в программе ELCUT.

Общие положения

Геометрическая модель – это набор геометрических объектов с заданными связями между элементами набора и свойствами материалов, источниками поля, граничными условиями.

Основными типами геометрических объектов модели являются вершина, ребро и блок.

Вершина – представляет собой точку на плоскости. Координаты такой точки могут быть введены пользователем вручную или вычислены как координаты пересечения пары рёбер. С каждой вершиной можно связать шаг дискретизации и метку. Величина шага дискретизации задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов поблизости от данной вершины. Метка вершины используется для задания, к примеру, линейного источника поля или нагрузки.

Ребро – представляет собой отрезок прямой или дугу окружности, соединяющие две вершины. Ребра модели не пересекают друг друга. Создаваемое новое ребро разбивается на части каждой лежащей на нем вершиной модели и каждой точкой пересечения с уже существующим ребром модели. В точках пересечений автоматически создаются новые вершины, которые, в свою очередь, делят на части уже существующие ребра. С каждым ребром может быть связана метка.

Блок – представляет собой связную подобласть плоскости модели, внешняя граница которой образована последовательностью рёбер. Внутри блоков могут находиться дыры. Каждая из границ, отделяющих блок от внутренних дыр, образовывается либо последовательностью рёбер, либо одной изолированной вершиной. В ка-

ждом блоке, входящем в расчетную область, должна быть построена сетка конечных элементов. Кроме того, поскольку в непомяченных блоках расчет поля не производится даже при наличии сетки конечных элементов, с блоком, входящим в расчетную область, должна быть обязательно связана метка. Сетку конечных элементов можно построить в любом наборе блоков модели. Ее плотность зависит от значений связанных с вершинами модели шагов дискретизации, которые можно либо рассчитать автоматически, либо задать для отдельных вершин вручную. Связанная с блоком метка используется, например, для описания физических свойств среды или задания распределенных источников поля.

Метка – представляет собой текстовую строку длиной до 16 символов. Метки позволяют ассоциировать геометрические объекты модели (блоки, ребра и вершины) с численными значениями физических свойств реальных объектов: свойств материалов, нагрузок и граничных условий. Метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и строчные буквы считаются различными.

Шаг дискретизации – задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов вблизи вершины геометрической модели. Задавая шаги дискретизации, можно управлять густотой сетки конечных элементов и тем самым точностью решения в тех или иных частях расчетной области.

Создание новой модели

После запуска ELCUT рабочий экран программы имеет вид, показанный на рис. 26.

Слева расположена задача, которая была активной на момент последнего закрытия программы (1), справа справочная информация (6).

Для создания новой задачи следует щелкнуть по кнопке «Создать» (2) (рис. 26). На экран будет выведен диалог, показанный на рис. 27.

В нем следует выбрать пункт «Задача ELCUT» и щелкнуть по кнопке «Готово». Далее программа выведет запрос на ввод названия и расположения файла с задачей (рис. 28).

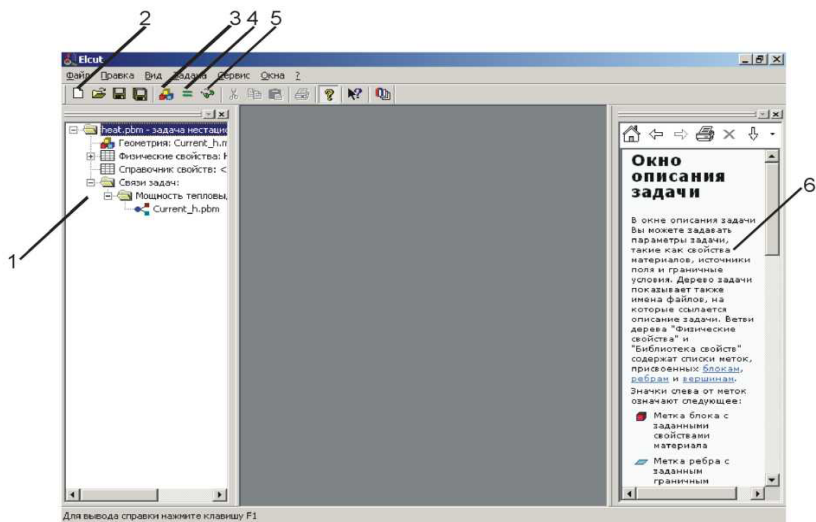


Рис. 26. Рабочий экран ELCUT после загрузки

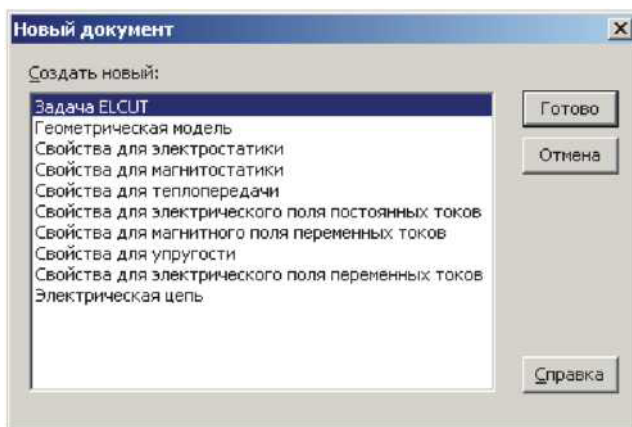


Рис. 27. Диалог «Новый документ»

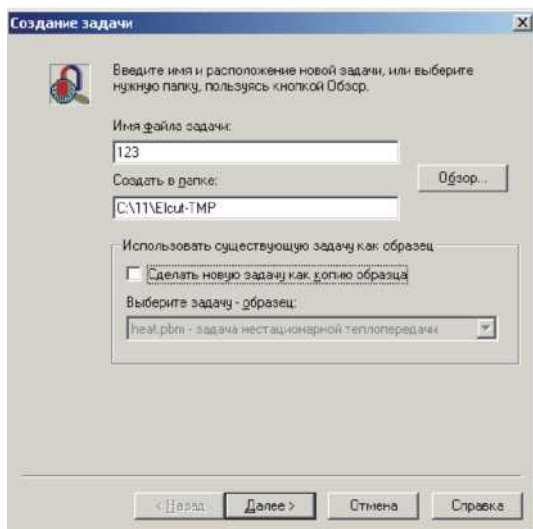


Рис. 28. Диалог «Создание задачи»

Основной файл задачи имеет расширение .pbm. В процессе вывода диалогов на экран соответствующим образом меняется содержание справочного окна. Для перехода в него следует щелкнуть по кнопке «Справка». После указания пути и названия файла программа выведет запрос о других параметрах задачи (рис. 29).

При работе с диалогом, показанным на рис. 29, следует особое внимание обратить на зону «Класс модели». Модель может быть «Плоской» или «Осесимметричной» (рис. 30).

Осесимметричные модели симметричны относительно оси Z , которая уходит от пользователя с поверхности вглубь экрана. По умолчанию глубина плоскопараллельной модели принимается равной 1 м.

После ввода этих данных ELCUT запрашивает информацию о единицах измерения и координатах. Единицы представлены диапазоном от микронов до километров. Работая со студенческой версией ELCUT, лучше выбрать миллиметры, так как данная версия позволяет ставить только 200 узлов сетки конечных элементов. После щелчка по кнопке «Готово» задача будет выведена в левую часть рабочего экрана ELCUT.

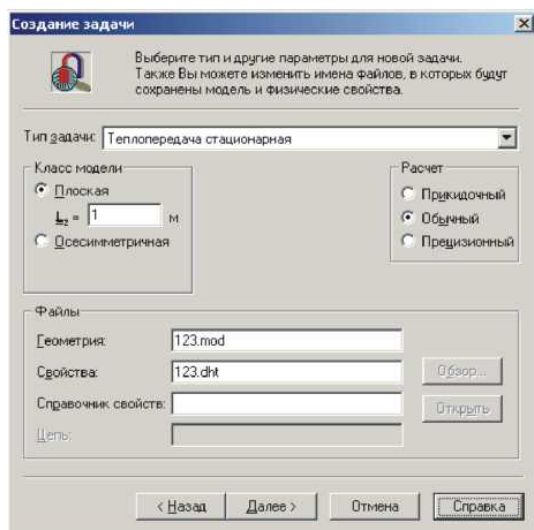


Рис. 29. Диалог «Создание задачи»

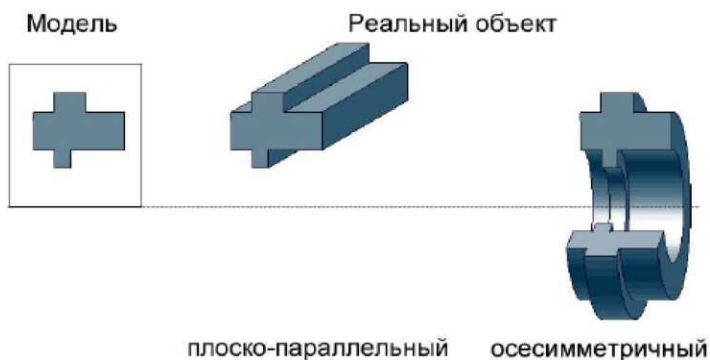


Рис. 30. Различия в классе модели

Настройка общих параметров задачи

Общие параметры задачи, ее тип, единицы измерения, точность решения можно изменить в процессе работы. Для этого в блоке задачи (1) (рис. 26) следует выделить ее название и запустить контекстную команду «Свойства» (запускается из списка контекстных команд, выводимого нажатием на правую кнопку мышки). После запуска команды на экран выводится диалог, показанный на рис. 31.

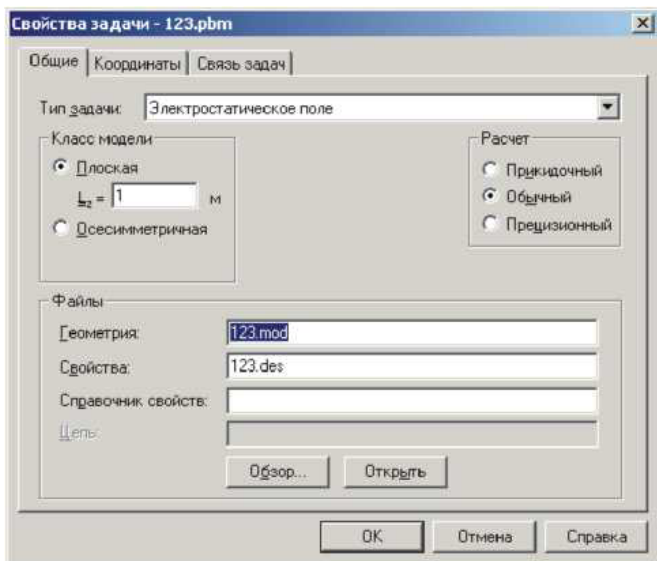


Рис. 31. Диалог «Свойства задачи»

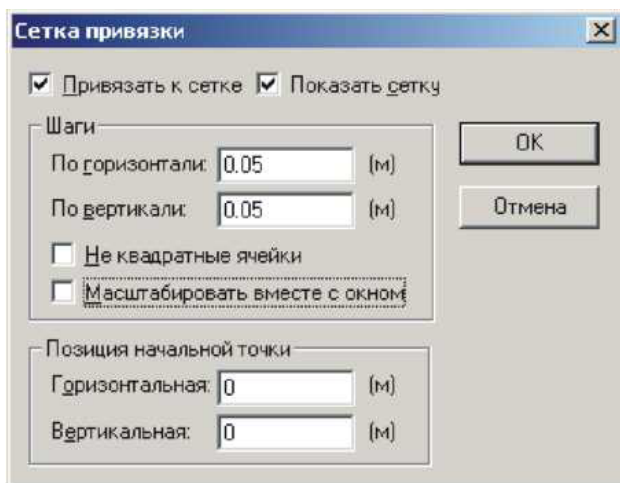


Рис. 32. Диалог настройки параметров сетки

Перед началом работы можно настроить координатную сетку и включить привязку к ней. Для этого следует поступить следующим образом.

1. Открыть графический редактор ELCUT. Для этого в блоке задачи (1) (рис. 26) выделить строку «Геометрия: НазваниеЗадачи» и щелкнуть по кнопке «Открыть модель» (3) (рис. 26.). Появится запрос «Файл с моделью не существует. Хотите ли Вы создать его?», на который следует ответить «Да».

2. Разместив указатель мышки над полем редактора, запустить контекстную команду «Сетка привязки». На экран будет выведен диалог, показанный на рис. 32.

Рекомендуется всегда использовать режим привязки к сетке и выводить саму сетку на экран. Команда «Масштабировать вместе с окном» включает или отключает изменение видимого размера ячеек сетки в процессе масштабирования изображения.

Построение геометрии

В ELCUT геометрия строится в пространстве графического редактора с помощью небольшого, но довольно простого и гибкого инструментария.

Основными графическими примитивами, которые можно построить, являются вершина, ребро, фигура.

Каждый элемент отрисовывается с помощью соответствующего инструмента. Все инструменты сосредоточены в панели «Модель» (рис. 33), которая выводится на экран только после активизации (щелчка мышкой по рабочей области) графического редактора.

Назначение кнопок понятно из их названий. Методика применения большинства функций интуитивно понятна и не нуждается в особых комментариях.

Следует отметить, что ELCUT снабжен лишь базовыми возможностями построения двумерной графики. Его возможностей хватит для построения несложного рисунка. Если рисунок сложный, состоит из большого количества элементов, то его проще

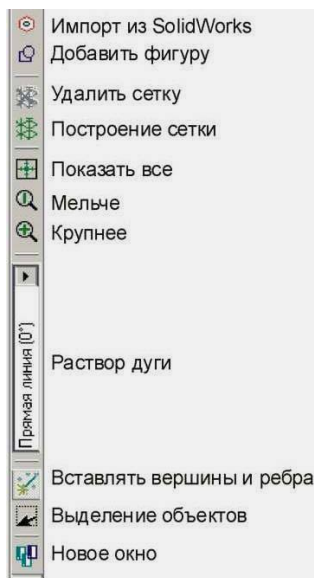


Рис. 33. Инструменты панели «Модель»

выполнить в специализированном графическом пакете, например AutoCAD, а затем импортировать в ELCUT. Для импортирования нужно сохранить исходный чертеж в формате DXF, после чего запустить «Файл/ Импорт DXF».

Построение ребра

Для создания нового ребра необходимо действовать по алгоритму.

1. Нажмите кнопку на панели инструментов «Вставлять вершины и ребра» (рис. 33) или клавишу INS, чтобы перейти в режим вставки.

2. Укажите раствор нового ребра в окне «Раствор дуги» (рис. 33). Выберите одно из значений, находящихся в выпадающем списке (прямая линия, четверть круга, половина круга, три четверти круга).

3. В начальной точке создаваемого ребра нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская ее, перетащите указатель к конечной точке. В процессе перетаскивания следует обращать внимание на координаты текущей точки, отображаемые в статус-строке в выбранных по чертежу единицах измерения.

Построение вершины

Чтобы создать новую вершину, необходимо действовать по алгоритму.

1. Выберите команду «Вставлять вершины и ребра» на панели инструментов, чтобы перейти в режим вставки.

2. Передвиньте указатель в точку, где нужно создать новую вершину, и дважды быстро нажмите левую кнопку мыши.

Или

1. Из меню «Правка» выберите «Добавить вершины».

2. Введите координаты новой вершины и нажмите кнопку «Добавить» (рис. 34).

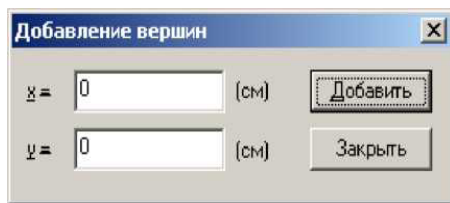


Рис. 34. Интерфейс ввода координат вершины

Вставка фигуры

Вставка фигуры позволяет ускорить процесс создания геометрии путем ввода стандартных геометрических фигур: круга, прямоугольника, эллипса. Их ввод осуществляется запуском команды «Добавить фигуру» из панели «Модель» (рис. 33). На экране появится диалог, показанный на рис. 35.

В диалоге нужно выбрать тип фигуры, указать базовые размеры, позицию центра (для прямоугольника это точка пересечения диагоналей) и угол. Угол определяет поворот относительно центральной точки против часовой стрелки.

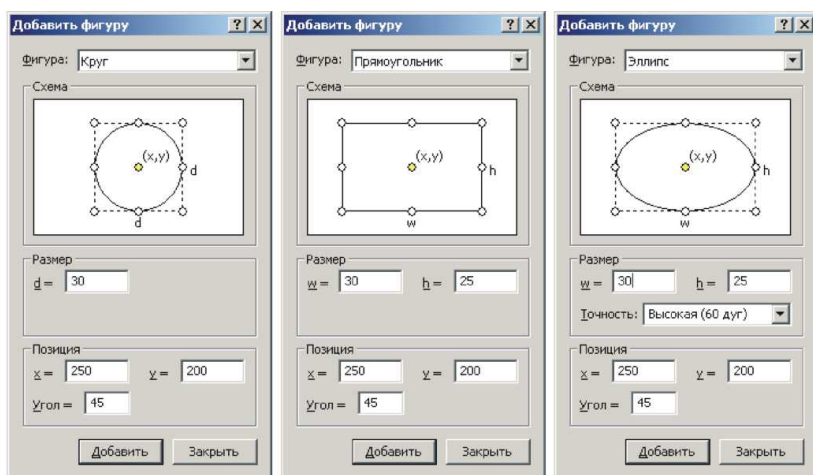


Рис. 35. Диалог «Вставка фигуры»

Выделение элементов геометрии

Для выделения объектов необходимо щелкнуть по кнопке «Выделение объектов» (рис. 33), а затем – по выделяемому объекту или выделить группу с помощью рамки.

Щелчок внутри блока не выделяет ребра или вершины, принадлежащие к границе этого блока. Аналогично щелчок в середине ребра не выделяет его концевые вершины.

Кроме того, при выделении одной из меток в окне описания задачи все геометрические объекты с такой меткой становятся выделенными.

Один и тот же набор выделенных объектов используется со всеми окнами модели. Поэтому, когда модель отображается в нескольких окнах, элементы выделяются во всех этих окнах одновременно.

Графический редактор ELCUT поддерживает горячие клавиши: CTRL+A – выделить всё; CTRL+D – снять выделение.

Снять выделение с элемента группы или добавить элемент к группе можно CTRL + щелчок мышкой по элементу.

Удаление объектов геометрии

Для того чтобы удалить один или группу объектов, их нужно выделить и нажать кнопку Del на клавиатуре.

Если некоторые из вершин являются точками соприкосновения двух ребер, представляющих собой продолжение друг друга, после удаления этих вершин такие ребра склеиваются, превращаясь в единственное ребро. Удаление любой другой неизолированной вершины всегда влечет за собой удаление всех примыкающих к ней ребер.

Редактирование объектов геометрии

Под редактированием понимают действия по изменению уже созданных объектов геометрии.

ELCUT позволяет копировать, вырезать, дублировать и перемещать выделенные объекты.

Копирование, вырезание и вставка осуществляются как обычно с помощью кнопок стандартной панели инструментов. Но вставка производится в то место на экране, где находился объект во время копирования или вырезания. Задать точку вставки нельзя. Этот способ удобен при переносе объектов из одного файла модели в другой. Наиболее эффективными являются «Дублирование» и «Перемещение» объектов, в которых можно задать точные расстояния смещения по X и Y.

«Дублирование» осуществляется по алгоритму.

1. Выделить любой набор объектов.
2. Выбрать команду «Дублировать выделенное» из меню «Правка» или контекстного меню.
3. Когда на экране появится диалог «Размножение объектов» (рис. 36), выбрать метод преобразования, ввести его параметры и нажать ОК.

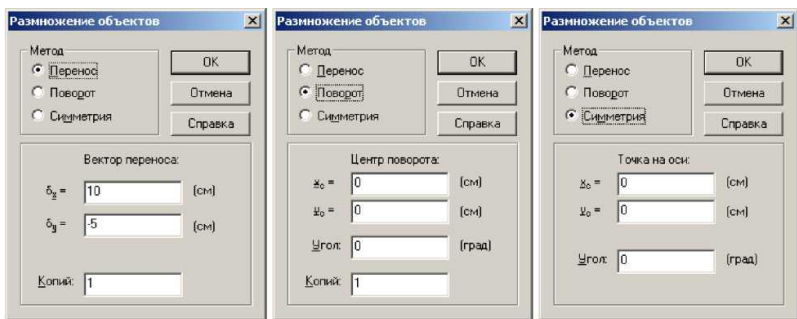


Рис. 36. Диалог «Размножение объектов» для разных методов дублирования

Операция копирования сохраняет все явно заданные свойства исходных объектов, включая метки и шаги дискретизации. Не копируется только сетка конечных элементов.

Первая копия любого объекта модели всегда является результатом выбранного преобразования, примененного к самому объекту. При одновременном создании нескольких копий каждая из последующих копий является результатом этого преобразования, примененного к предыдущей копии.

Чтобы переместить выделенные объекты, выберите команду «Передвинуть выделенное» из меню «Правка» или контекстного меню. Появится диалог для ввода параметров (рис. 37), похожий на аналогичный диалог, выводимый при дублировании. Отличием является команда «Масштабирование».

Успешная операция перемещения сохраняет все метки и шаги дискретизации. Сетка конечных элементов сохраняется в блоках, форма которых при перемещении не изменяется.

В ходе дублирования или перемещения возможны следующие команды.

Смещение – параллельный перенос выделенных объектов на заданный вектор. При копировании можно задать несколько копий. Это означает многократное повторение операции с объектом, являющимся результатом предыдущего переноса.

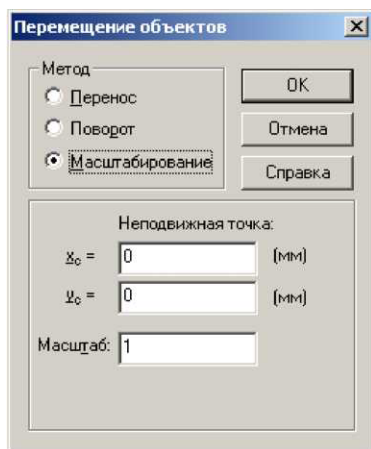


Рис. 37. Диалог «Перемещение объектов»

Поворот – поворот выделенных объектов вокруг указанной точки на заданный угол. При копировании можно задать несколько копий. Угол поворота указывается в градусах. Положительное значение угла соответствует направлению против часовой стрелки.

Симметрия – симметричное отображение выделенных объектов относительно оси симметрии, проходящей через заданную точку под заданным углом к оси X. Это преобразование применяется только для копирования объектов. Задать несколько копий нельзя. Параметры – координаты точки и угол от оси абсцисс до оси симметрии в градусах.

Масштабирование – увеличение или уменьшение выделенных объектов относительно заданной точки, называемой центром подобия. Это преобразование применяется только для перемещения объектов. Параметры – координаты центра подобия и коэффициент растяжения или сжатия. При растяжении коэффициент должен быть больше, а при сжатии – меньше единицы.

Имеется также упрощенный способ перемещения или копирования геометрических объектов – перетаскивание. Оно осуществляется по алгоритму.

1. Выделить перемещаемые объекты.
2. Разместить указатель над выделенной линией и нажать правую кнопку мышки.

3. Не отпуская кнопку, переместить указатель и движущиеся за ним объекты в новое место.

4. Отпустить кнопку и из появившегося меню выбрать вариант действия программы (Передвинуть со связями, Передвинуть без связей, Копировать, Отменить). Если выбран вариант «Передвинуть со связями», то примыкавшие к передвинутому объекту ребра автоматически будут продлены или обрезаны, для того чтобы сохранить общий контур фигуры. Вариант «Передвинуть без связей» просто передвигает объект в новое место.

Если выделить вершину, то это позволит растянуть или сжать примыкающие к ней ребра. Если в процессе перетаскивания использовать левую кнопку мышки, то этот процесс будет автоматически проходить в режиме «Передвинуть со связями».

Отмена/возврат команд

Для этих действий можно использовать следующие горячие клавиши:

CTRL+Z – отменить;

CTRL+Y – вернуть.

По умолчанию ELCUT «помнит» последние 25 действий. Можно увеличить это число до 100 или уменьшить до 0 (в целях экономии оперативной памяти). Для изменения стека необходимо из меню «Правка» запустить команду «Настройка отмены». Далее появится простой интерфейс для ввода нового числа (Глубина буфера отмены команд).

Импорт геометрии

Помимо непосредственного задания геометрии модели средствами графического диалога в ELCUT имеется возможность импорта геометрической модели или ее части из файла в формате DXF, который создан в любой современной САПР программе, например AutoCAD.

Для импорта модели следует действовать по алгоритму.

1. Создать чертеж в САПР.
2. Сохранить чертеж в формате DXF.
3. В программе ELCUT из меню «Файл» запустить команду «Импорт DXF».

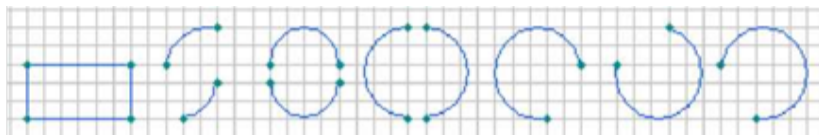
4. В появившемся стандартном диалоге «Открыть» найти требуемый файл и загрузить его.

5. Вершины на концах и пересечениях ребер ELCUT проставит сам.

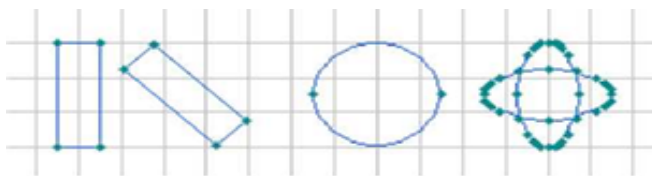
Можно создавать модель в ELCUT, сохранить ее в формате DXF (Файл/ Экспорт модели) и загрузить в САПР. Кроме того, можно экспортировать КЭС в виде текстового файла для обработки в собственном или стороннем решателе. В составе дистрибутива ELCUT имеется утилита для импорта таких файлов в программу MATLAB в формате, совместимом с пакетом расширения для работы с дифференциальными уравнениями в частных производных Partial Differential Equations Toolbox (PDE Toolbox).

Задания к практической работе 1

1. Создать новую задачу с типом «Теплопередача стационарная». Единицы измерения – миллиметры.
2. Настроить шаг сетки равным 2 мм.
3. Отключить масштабирование сетки вместе с окном.
4. Построить следующие контуры.



5. С помощью команды «Вставить фигуру» построить следующие контуры.



6. Продемонстрировать методы выделения объектов.
7. Продемонстрировать методы копирования и вставки объекта.
8. Продемонстрировать процедуру размножения объектов (Перенос).
9. Продемонстрировать процедуру размножения объектов (Поворот).
10. Продемонстрировать процедуру размножения объектов (Симметрия).

11. Продемонстрировать перемещения размножения объектов (Масштабирование).
12. Продемонстрировать функцию перетаскивания объектов.
13. Нарисовать сложный контур (выдается преподавателем).

Практическая работа 2

Простановка меток, приложение нагрузок, построение сетки

Цель работы – ознакомиться с назначением, правилами и инструментами создания меток, приложения нагрузок и построения сетки конечных элементов.

Общие положения

Геометрическая модель – это набор геометрических объектов с заданными связями между элементами набора и свойствами материалов, источниками поля, граничными условиями. В практической работе 1 рассмотрены методы создания чертежа (геометрии), в данной работе – методы указания параметров среды, в которой находится изучаемый объект, и свойств материалов, из которых он сделан.

Для того чтобы ELCUT отличал элементы геометрии друг от друга и «понимал», какими свойствами они обладают, объектам модели присваиваются собственные названия – метки. Присвоенные метки отображаются в блоке задачи. Если свойства объекта описываются, то ему необходимо предварительно присвоить метку. Ребра и блоки должны иметь метку обязательно, иначе решение задачи даже не начнется.

У каждого объекта есть два типа свойств – геометрические и физические. Первые вызываются контекстной командой «Свойства» из графического редактора, вторые такой же командой, но уже из блока задачи.

Простановка меток

Метка ставится на любой объект геометрии – вершину, ребро, блок. При этом ELCUT автоматически понимает, какой объект, какого типа обрабатывается. Алгоритм простановки меток довольно прост: выделить объект или группу однотипных объектов, щелчком

правой кнопки мышки вызвать контекстное меню и запустить команду «Свойства». Далее в появившемся диалоге (рис. 38) указать название метки.

Затем в появившемся диалоге (рис. 38) ввести название метки. Новая метка выводится в блоке задачи (рис. 39) в каталог, который соответствует типу обрабатываемого объекта.

Метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и строчные буквы считаются различными. Название может вводиться как на английском, так и на русском языке, но количество символов не должно превышать шестнадцать.

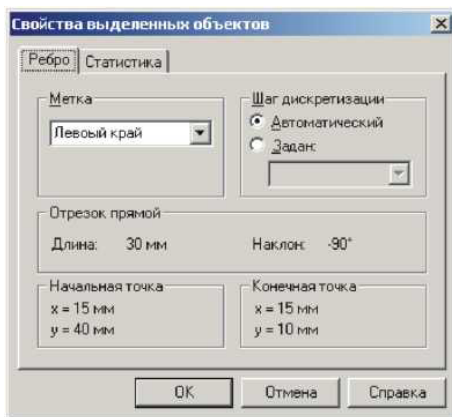


Рис. 38. Диалог присвоения метки

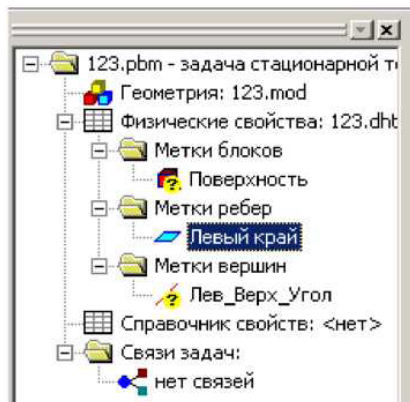


Рис. 39. Блок задачи

Приложение нагрузок

Нагрузкой в CAE (Computer Aided Engineering) программах называют совокупность значений параметров и граничных условий, действующих в рамках анализируемой модели.

Каждому помеченному (названному) объекту геометрии присваиваются значения физических величин, которые он обозначает. Например, если с ребра температура уходит конвективно, то указывают значение коэффициента конвекции; если блок проводит электрический ток, то указывают его проводимость и пр. Правильная постановка нагрузок является залогом точного решения задачи.

Для присвоения физических значений необходимо в блоке задачи (рис. 39) выделить помеченный объект и вызвать контекстную команду «Свойства». В зависимости от типа задачи (электрическая, тепловая и пр.), а также типа выделенного объекта (блок, ребро, вершина) содержание выведенного диалога будет разным. На рис. 40 показаны диалоги при тепловой задаче для блока, ребра и вершины.

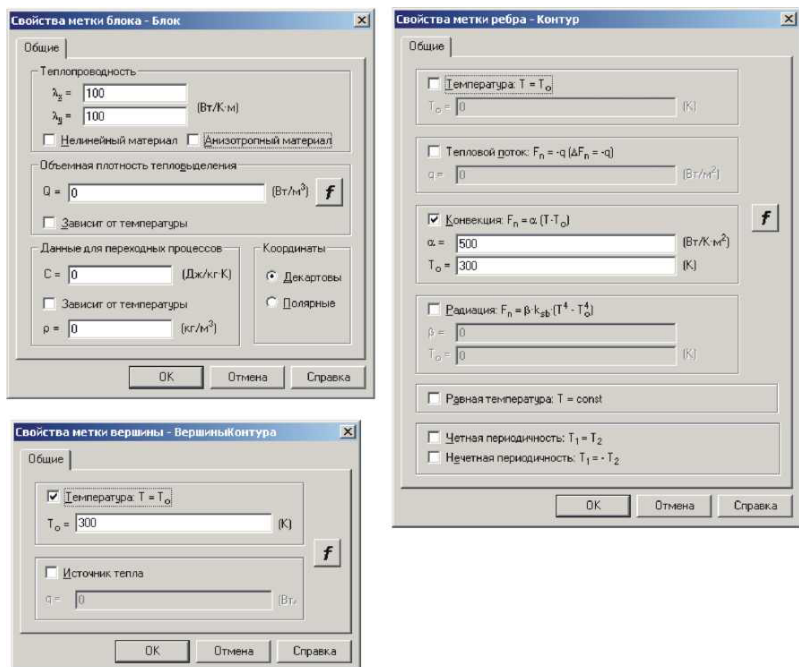


Рис. 40. Физические свойства блока, ребра и вершины в тепловой задаче

Нужно обратить внимание, что вызывать команду свойства нужно при выделении объекта именно в блоке задачи, а не в графическом редакторе. Иначе будут выведены другие – геометрические свойства.

Знак «f» означает, что в текстовое окно можно ввести формулу по правилам, аналогичным вводу формул в языке программирования Visual Basic. После нажатия этой кнопки выводится раздел справочной информации, в котором описывается методика ввода формул.

Некоторые значения нельзя задать ни конкретным числом, ни формулой. Они в справочной литературе представлены в виде графиков и таблиц. ELCUT «знает» параметры такого типа и при попытке их ввода выводит на экран соответствующий интерфейс (рис. 41).

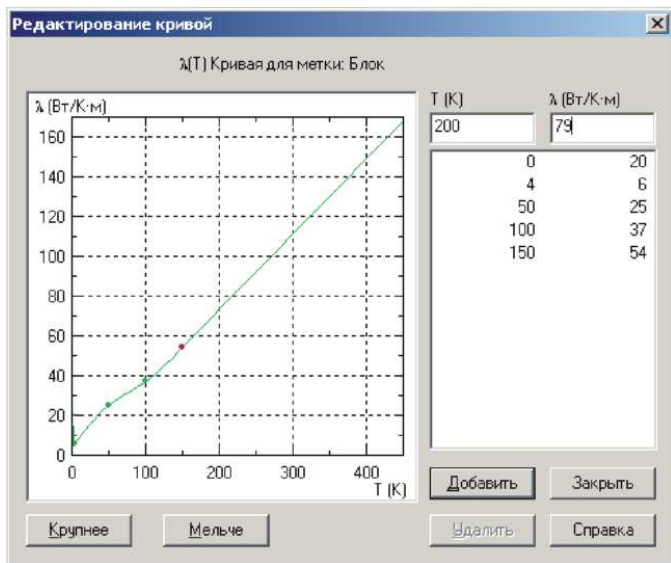


Рис. 41. Интерфейс ввода табличных величин

На данных формах некоторые параметры нуждаются в особых комментариях.

1. Нелинейный материал – материал, теплопроводность которого меняется с изменением температуры.
2. Анизотропный материал – материал, свойства которого меняются в зависимости от направления изменения параметра.

3. Ортоотропный материал – материал с постоянной теплопроводностью.

4. Изотропный материал – материал, параметры которого (например, теплопроводность и теплоемкость) зависят от температуры.

5. Параметр T_0 в блоках «Конвекция» и «Радиация» – температура окружающей среды. Измеряется в Кельвинах ($0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$).

6. Равная температура – данным условием помечаются ребра, на которых температура принимает постоянное, но заранее неизвестное значение. Ребро, описанное условием равной температуры, не должно соприкасаться с любым ребром, где температура задана.

Каждая точка на графике (рис. 41) вводится следующим образом:

- в текстовые окна, расположенные в правом верхнем углу формы, вводим соответствующую пару чисел;
- нажимаем кнопку «Добавить».

Если выделить ранее введенную строку, то появится кнопка «Изменить», которая сохраняет введенные пользователем изменения.

Простановка шагов дискретизации

Решение всех типов задач программа ELCUT проводит методом конечных элементов. Одной из важнейших составляющих данного метода является расчет и наложение на геометрию сетки конечных элементов. Густота или разреженность сетки регулируется таким параметром, как «Шаг дискретизации» (рис. 38).

Чем плотнее сетка, тем точнее полученные результаты, но и тем дольше программа выполняет расчет. При грамотной настройке можно сгущать сетку в местах сильной неоднородности поля и разряжать в зонах стабильного параметра. Сгущать сетку в задачах теплопроводности можно в зонах, например, приближенных к источникам тепла (рис. 42).

Шаг дискретизации можно не задавать, так как ELCUT сам рассчитывает его параметр. Если пользователь не согласен с предложением программы или хочет задать шаг самостоятельно, то это можно сделать в диалоге «Свойства выделенных объектов» (рис. 43), для вызова которого необходимо выделить объект или группу объектов, а затем запустить контекстную команду «Свойства».

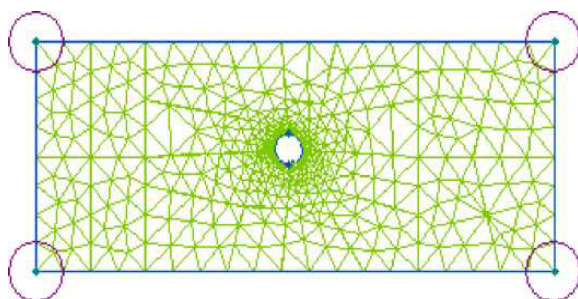


Рис. 42. Сгущение конечно-элементной сетки вокруг источника тепла

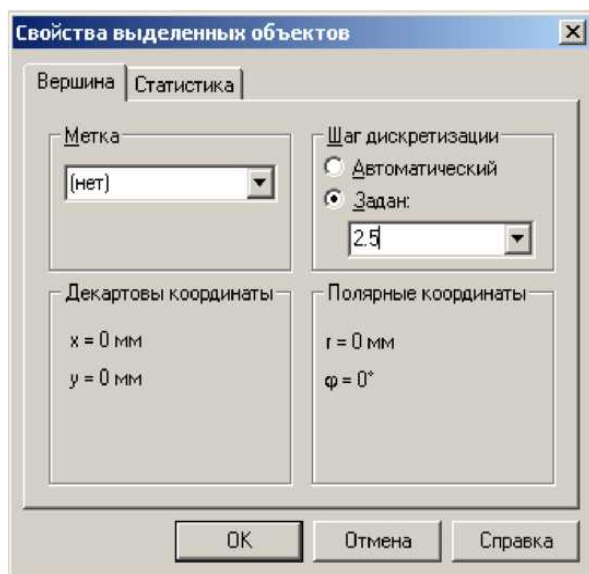


Рис. 43. Диалог «Свойства выделенных объектов»

Зона «Шаг дискретизации» одинакова для всех типов элементов модели (вершин, ребер, блоков). Если необходимо ввести собственное значение, следует щелкнуть по слову «Задан» и ввести число в текстовое окно, расположенное под этим словом. Дробные значения вводятся через точку.

Собственный шаг дискретизации можно ставить любому объекту модели. Новые значения отменяют старые без запросов на под-

тверждение. Например, если указан шаг в вершинах ребра, а затем вводится другое значение для самого ребра, то сетка будет строиться на основе последнего числа.

В студенческой версии ELCUT можно построить сетку, в которой не более 250 узлов. В профессиональной версии количество узлов может исчисляться миллионами. Чем больше узлов, тем точнее решение задачи.

Вывод сетки

Сетка строится по площадям блоков. Наиболее простым методом вывода сетки является следующий.

1. Выделить блоки, в которых необходимо поставить сетку (несколько блоков можно выделить, удерживая нажатой кнопку Ctrl и щелкая по ним мышкой).

2. Щелкнуть по кнопке «Построение сетки» в меню «Модель».

Дать команду на построение сетки можно также из ниспадающего меню «Правка» командой «Поставить сетку». Далее сетка строится автоматически.

Если после вывода сетки пользователь изменил геометрию модели или шаг дискретизации на каком-либо объекте, то сетка удаляется автоматически и для ее вывода нужно запустить соответствующую команду вновь. Чем больше узлов сетки, тем дольше она ставится.

В панели «Модель» имеется кнопка «Удалить сетку». Если на момент ее запуска выделен блок с сеткой, то сетка будет удалена только из него. Если на момент запуска нет выделенных блоков, то сетка будет удалена из всех блоков сразу.

Пример пошагового решения задачи стационарной теплопроводности

Рассмотрим последовательность действий, которая необходима для решения следующей задачи. Дана металлическая пластина с размерами $1 \times 2 \times 0,1$ см. Левый нижний угол пластины нагревают от внешнего источника тепла. Определить температуру в каждой точке поверхности пластины в условиях стационарного режима теплопроводности.

Параметры

Блок. Теплопроводность пластины 75 (Вт/К-м).

Ребра. С границ тепло уходит конвективно ($a = 50$ Вт/К-м², $T_0 = 293$ К).

Вершина. Точечный источник тепла $q = 100$ Вт/м.

Выполнение

1. Запустить программу ELCUT.
2. Щелкнуть по кнопке «Создать».
3. В появившемся диалоговом окне выбрать «Задача ELCUT». Нажать «Готово». Нажать «Далее».
4. Присвоить файлу, в котором будет храниться задача, название (например, 12345). Нажать «Далее».
5. Выбрать тип задачи «Теплопередача стационарная» и указать толщину пластины (L_2) 0,001 м. Нажать «Далее».
6. Выбрать единицы измерения «см». Нажать «Готово».
7. В блоке задачи выделить строку «Геометрия»: 12345.mod и щелкнуть по кнопке «Открыть модель».
8. Разместив указатель мышки над клетчатым полем графического редактора, щелкнуть правой ее кнопкой и запустить команду «Сетка привязки».
9. Задать шаг сетки равным 1 см и отключить масштабирование координатной сетки вместе с окном.
10. В графическом редакторе нарисовать прямоугольник со сторонами 1 и 2 см.
11. Выделить вершину левого нижнего угла, присвоить ей метку «Источник». Для этого после выделения запустить контекстную команду «Свойства».
12. Выделить все четыре ребра и присвоить им метку «Ребра». Для этого после выделения запустить контекстную команду «Свойства».
13. Щелкнув мышкой внутри прямоугольника, выделить его площадь и присвоить метку «Плоскость». В том же диалоге указать ручной шаг дискретизации, равный 0,15.
14. Выделив в блоке задачи строку «Плоскость», запустить контекстную команду «Свойства». В появившемся диалоге указать, что теплопроводность равна 75.

15. Выделив в блоке задачи строку «Ребра», запустить контекстную команду «Свойства». В появившемся диалоге выбрать зону «Конвекция» и указать, что ($a = 50 \text{ Вт/К-м}^2$, $T_0 = 293 \text{ К}$).

16. Выделив в блоке задачи строку «Источник», запустить контекстную команду «Свойства». В появившемся диалоге выбрать зону «Источник тепла» и указать, что ($q = 100 \text{ Вт/м}$).

17. Выделить плоскость прямоугольника и, щелкнув по кнопке «Построение сетки», заполнить плоскость сеткой конечных элементов.

18. Далее щелкнуть по кнопке «Сохранить все файлы» (рис. 44) задачи в «Общей панели» инструментов или из ниспадающего меню «Файл» запустить аналогичную команду.

19. Нажать кнопку «Решить» из Общей панели инструментов (рис. 44).

20. Если все было сделано правильно, то на экране появится температурное поле, показанное на рис. 45.

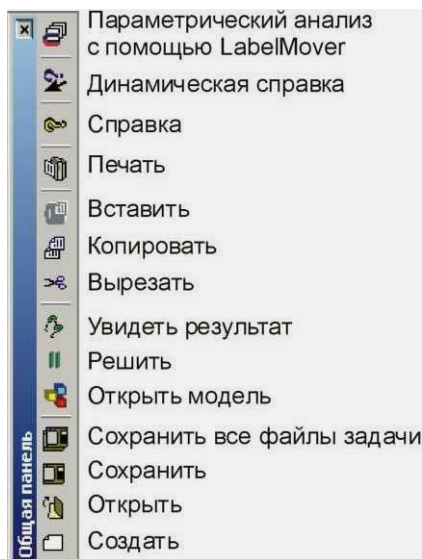


Рис. 44. Содержание Общей панели инструментов



Рис. 45. Распределение температуры по плоскости

Задания к практической работе 2

1. Повторить пример из пункта «Пример пошагового решения задачи стационарной теплопроводности» (стр. 52).
2. Продемонстрировать методику простановки меток для блоков, ребер и вершин.
3. Продемонстрировать методику приложения нагрузок к блоку, ребру и вершине.
4. Продемонстрировать методику настройки и вывода сетки конечных элементов на модель.
5. Опираясь на пример из пункта «Пример пошагового решения задачи стационарной теплопроводности» (стр. 52), рассчитать аналогичную задачу по геометрии и параметрам, которые даст преподаватель.

Практическая работа 3

Решение задач теплопроводности

Цель работы – ознакомиться с процедурой выполнения расчета в целом на примере решения некоторых стандартных задач теплотехники.

Задача 1. Дан стальной цилиндр с известными размерами и температурами на внутренней и внешней стенках. НАЙТИ распределение температуры внутри его стенки.

Геометрия цилиндра представлена на рис. 46. Стенка сделана из стали, коэффициент теплопроводности $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Температура на внутренней поверхности цилиндра $T_1 = 293 \text{ К}$.

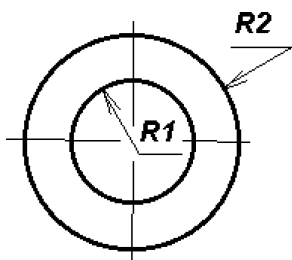


Рис. 46. Геометрия цилиндра к задаче 1: $R_1 = 20$ мм, $R_2 = 40$ мм

Температура на внешней поверхности цилиндра $T_2 = 313$ К.

Решение должно быть представлено цветной картиной поля, пример которой дан на рис. 47, и графиком изменения температуры по радиусу стенки.

Примечание. Следует обратить внимание: в данной постановке не рассматривается взаимодействие цилиндра с окружающей средой, т. е. мы имеем дело с граничными условиями первого рода.

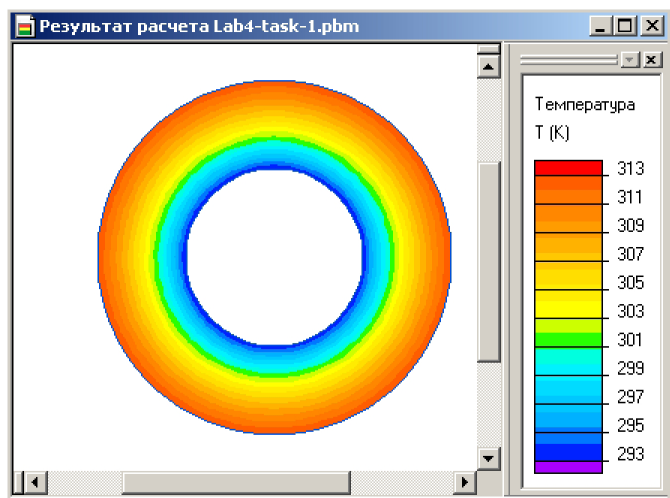


Рис. 47. Решение задачи 1

Задача 2. Дана стальная стенка, разделяющая две среды. Например, стальная кружка с кипятком. **НАЙТИ** распределение температуры по толщине стенки при передаче сквозь нее тепла.

Геометрия задачи показана на рис. 48.

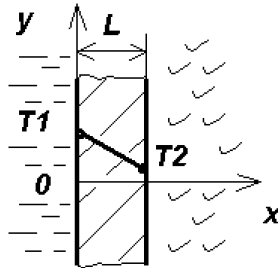


Рис. 48. Рисунок к задаче 2

Исходные данные:

Стенка сделана из стали, коэффициент теплопроводности $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Температура на внутренней поверхности стенки $T_1 = 373 \text{ К}$. Температура на внешней поверхности стенки $T_2 = 293 \text{ К}$. Толщина стенки $L = 10 \text{ мм}$.

Решение должно быть представлено цветной картиной поля и графиком изменения температуры по толщине стенки.

Задача 3. Дана стальная стенка, разделяющая две среды. **НАЙТИ** распределение температуры по толщине стенки с учетом конвективной передачи тепла (т. е. при граничных условиях третьего рода).

Геометрия задачи показана на рис. 49.

Исходные данные:

Стенка сделана из стали, коэффициент теплопроводности $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Температура жидкости $T_1 = 373 \text{ К}$. Коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке $\alpha_1 = 240 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Температура наружного воздуха $T_2 = 293 \text{ К}$. Коэффициент теплоотдачи от стенки в воздух $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Толщина стенки $L = 10 \text{ мм}$.

Решение должно быть представлено цветной картиной поля и графиком изменения температуры по толщине стенки.

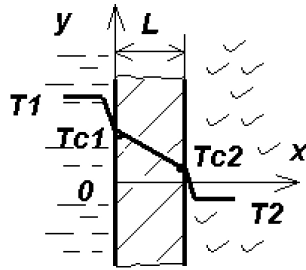


Рис. 49. Рисунок к задаче 3

Примечание. Температура будет изменяться незначительно, поэтому картина поля будет одноцветной. Изменение параметра лучше смотреть с помощью графика. Почему распределение температуры здесь отличается от предыдущей задачи? Так и должно быть. В задаче 2 мы задали температуру на внешней поверхности, но не указали, как она там создается (наверное, интенсивное омывание холодной средой). Здесь же мы рассчитали температуру на внешней поверхности в условиях естественной конвекции. Если налить кипятка в стальную кружку, то поверхность кружки будет горячей.

Задание к практической работе 3

Решить с помощью программы ELCUT описанные в данной работе три задачи. В качестве результатов должны быть представлены картина поля температуры и градиента с изотермами и векторами, график и таблица.

Практическая работа 4

Проведение расчета и анализ результатов

Цель работы – ознакомиться с процедурой выполнения расчета, а также инструментами анализа и визуализации результата.

Запуск решения задачи

После создания геометрии, простановки меток, приложения нагрузки и расчета сетки можно приступить к решению задачи. Запуск этого процесса выполняется всего двумя щелчками мышки. Первый раз щелкаем по кнопке «Сохранить все файлы задачи», второй – по кнопке «Решить».

Скорость расчета прямо пропорционально зависит от количества узлов конечно-элементной сетки и числа шагов по времени (для нестационарных задач). По сравнению с аналогичными пакетами других разработчиков ELCUT работает от 20 до 50 раз быстрее за счет оптимизированных алгоритмов.

Если нагрузка приложена неправильно, то ELCUT выведет сообщение с описанием ошибки и не приступит к процессу счета.

Анализ результатов решения

Для того чтобы приступить к просмотру и анализу результатов решения задачи, необходимо запустить из меню «Задача» команду «Анализ результатов» или щелкнуть по кнопке «Увидеть результат».

ELCUT позволяет представить решение задачи несколькими способами:

- картины поля;
- локальные полевые значения;
- интегральные величины;
- мастера вычисления параметров;
- графики и таблицы в пространстве;
- графики и таблицы во времени;
- схема присоединенной электрической цепи.

Любая картинка или физическая величина, отображаемая при анализе результатов решения, может быть скопирована в буфер обмена для дальнейшего использования в каком-нибудь текстовом редакторе.

Набор физических величин, которые могут быть отображены в виде картины поля, зависит от типа задачи.

Например, в задаче теплопроводности в картине поля можно увидеть:

- 1) температуру T в любой точке поверхности;
- 2) вектор плотности теплового потока;
- 3) теплопроводность.

Картина поля

Цветная карта показывает распределение на плоскости значения выбранной физической величины. Цветная карта сопровождается цветовой шкалой, показывающей соответствие между цветом и значением физической величины.

Можно выводить на экран картину поля сразу несколькими способами для получения наиболее ясного представления.

Можно одновременно работать с несколькими разными картинками поля для одной и той же задачи. Чтобы открыть новое окно, следует щелкнуть по кнопке «Новое окно» в панели «Анализ результатов» (рис. 50).

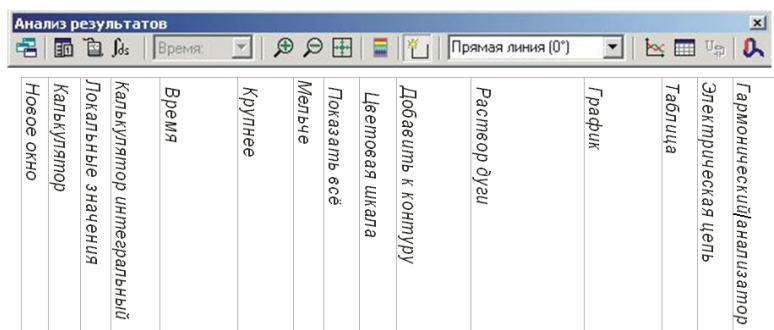


Рис. 50. Панель «Анализ результатов»

После того как задача решена, в окне анализа результатов автоматически отображается картина поля, используемая по умолчанию (рис. 51). Чтобы изменить вид картины, нужно из контекстного меню выбрать команду «Картина поля» или в меню «Вид» запустить команду с таким же названием.

После запуска контекстной команды «Картина поля» в случае решения задачи теплопроводности на экран выводится диалоговое окно, показанное на рис. 52.

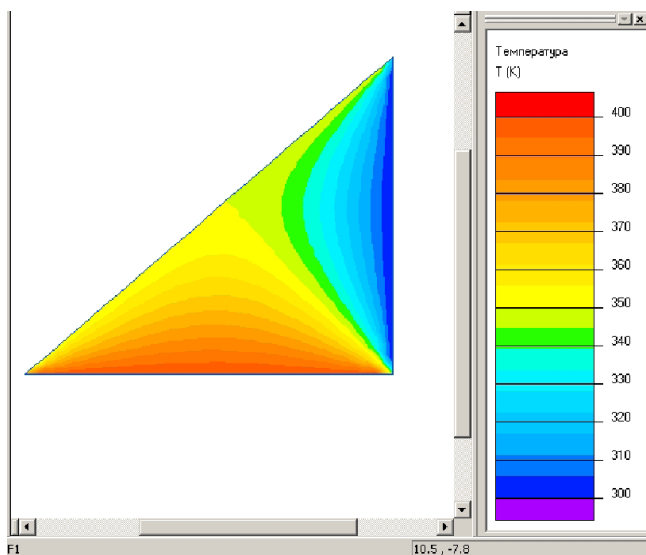


Рис. 51. Картина поля для тепловой задачи. Нижнее ребро – 400 К, левое – 350 К, правое – 300 К

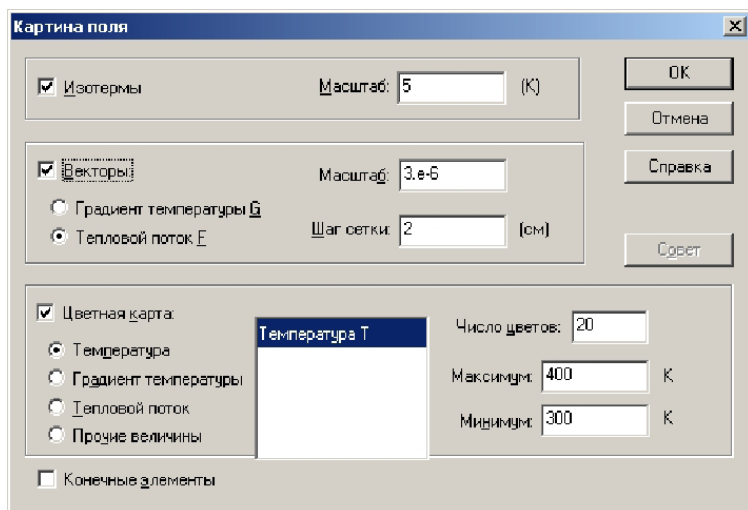


Рис. 52. Диалоговое окно «Картина поля»

Элементы окна имеют следующее назначение.

Изотермы – выводит линии равной температуры.

Векторы – выводит стрелки, показывающие направление убывания температуры.

Цветная карта – выводит цветную заливку в контур. Если галочку снять, то будут выведены только изотермы и векторы.

Треугольная пластина с разными температурами по ребрам с изотермами и векторами имеет вид, показанный на рис. 53.

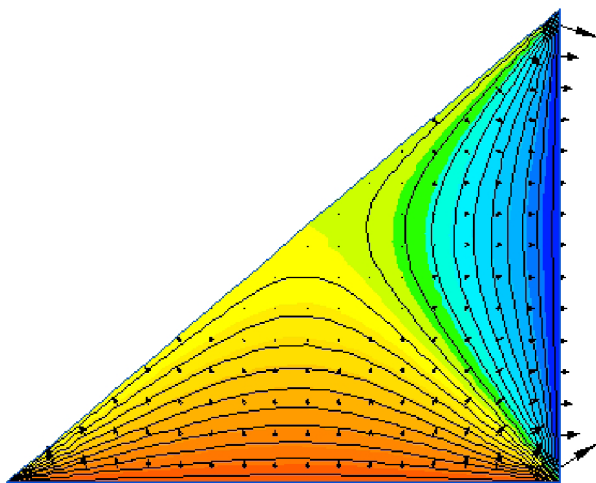


Рис. 53. Картина поля с изотермами и векторами теплового потока

В зависимости от типа задачи результаты и инструменты их обработки меняются. В частности, для других типов задач окно «Картина поля» будет содержать другие элементы.

Работая с этим окном, особое внимание следует обратить на кнопку «Совет». Если поставить курсор в поле, в которое нужно ввести значение параметра, и пользователь не знает, какое число вводить, то щелчок по кнопке выведет в текущее поле такое значение, которое рекомендует программа исходя из имеющихся данных. Наиболее подходящие величины для полей «Минимум» и «Максимум» вычисляются для видимой в данный момент на экране части изображения.

В нестационарных задачах картина поля изображается для определенного момента времени. В окне на панели инструментов выводится текущий момент времени. Вы можете выбрать другой момент времени в выпадающем списке (рис. 54).

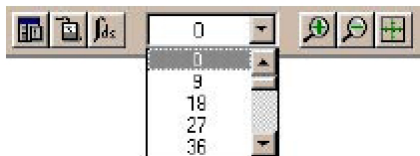


Рис. 54. Выбор момента времени

При первом показе отображается конечный момент времени. Картины поля, графики и таблицы пересчитываются автоматически при изменении момента времени.

Картина поля является самым наглядным и зачастую основным результатом расчета.

Локальные полевые значения

Локальные полевые значения — это значения определенных параметров в конкретных точках рассчитанного поля. Для их вывода нужно на панели «Анализ результатов» щелкнуть по кнопке «Локальные значения», а затем — по интересующей точке поля (рис. 55).

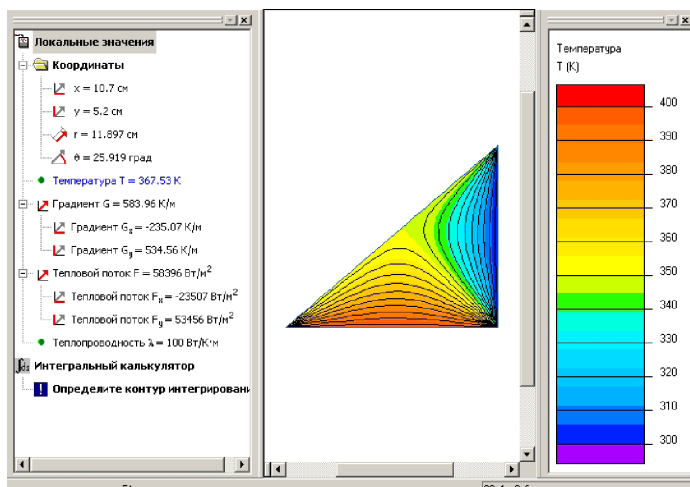


Рис. 55. На рабочем экране присутствует калькулятор локальных полевых значений

Работая в блоке локальных значений, выполнить следующее.

1. Дважды с интервалом в 3 с щелкнуть по координате X или Y и ввести координаты требуемой с клавиатуры, а не искать ее мышкой.

2. Дважды щелкнув по названию параметра, дать команду на вывод его значений на карту поля.

Интегральный калькулятор выводит значения, общие для определенной зоны анализируемой поверхности. Например, среднюю температуру, разность температур, площадь поверхности, средний тепловой поток и пр. Для ввода контура нужно воспользоваться командами из ниспадающего меню «Контур» (рассмотрено ниже).

Кроме прочего, в калькуляторе есть три мастера:

- 1) мастер индуктивности;
- 2) мастер емкости;
- 3) мастер импеданса — вычисляет импеданс проводников (полное комплексное сопротивление переменному току).

После двойного щелчка по строке с соответствующим названием ELCUT выводит несколько диалоговых окон для ввода специальных параметров, а затем выводит результат дополнительного расчета.

Редактирование контуров

Контуром называется направленная ломаная линия, состоящая из отрезков прямых и дуг окружностей.

Контур в ELCUT используются:

- для построения графиков изменения физических величин вдоль контура (см. диалоговое окно «Графики» панели инструментов);
- вычисления линейных, поверхностных и объемных (для замкнутых контуров) интегралов (см. диалоговое окно «Вычисление интегралов» панели инструментов);
- табличного вывода распределения поля вдоль контура на экран, в буфер обмена и в текстовый файл (см. диалоговое окно «Таблицы физических величин вдоль контура» панели инструментов).

Правила, действующие для контуров, заключаются в следующем.

1. Контур не может пересекать сам себя.
2. Замкнутые и разомкнутые контуры различаются.
3. Замкнутые контуры используются для вычисления интегралов и средних значений.

Контур изображается при помощи направленных отрезков и дуг либо, если он замкнут и положительно ориентирован (против часовой стрелки), – в виде залитого цветом многоугольника.

ELCUT позволяет создавать и модифицировать контур только в окне картины поля.

Команды для работы с контуром сосредоточены в меню «Контур». Оно появляется только тогда, когда становится активным окно с картиной поля. В начале работы над контуром бывают активны команды «Ввод линий» (ввод линий по координатам), «Добавить (Линия/ Ребро/ Блок)» – наиболее удобный и простой инструмент построения (переключение на отрисовку дуг происходит в списке «Раствор дуги» как при построении геометрии). После начала работы или построения контура становятся активными «Замкнуть», «Сменить направление», «Отменить последнюю линию», «Удалить все».

На рис. 56 изображено температурное поле с линейным контуром. Вдоль линии контура значение температуры уменьшается. Совокупность значений температуры, лежащих под линией контура, ELCUT может обрабатывать отдельно от других, например, построить график изменения температуры в осях длина – температура.

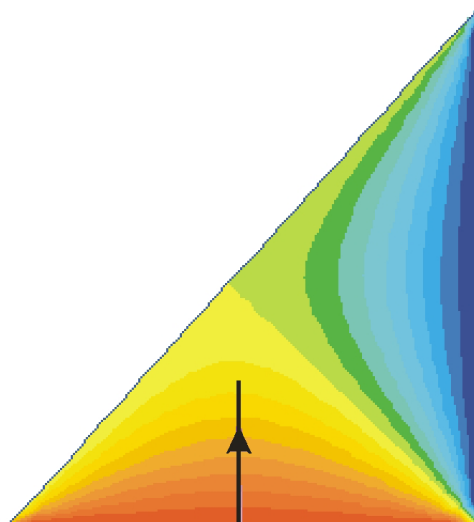


Рис. 56. Линейный контур на картине поля

На одной цветовой карте может быть только один контур. Если нужно рассмотреть несколько различных контуров, то необходимо открыть новое окно. Для того чтобы получить значения, описывающие фрагмент или полную площадь геометрии, например среднюю температуру поверхности, необходимо провести контур по ребрам модели и замкнуть его соответствующей командой из меню «Контур».

Графики

График строится только по указанному контуру, т. е. программа выводит изменение параметра по линии и направлению контура в зависимости от координаты X (линейное измерение длины контура от 0 до конца согласно направлению в единицах измерения чертежа). Для его построения нужно создать контур и щелкнуть по кнопке «График» в панели «Анализ результатов». На экране появится график с параметром по умолчанию и окно (рис. 57), в котором можно выбрать другой уже рассчитанный параметр.

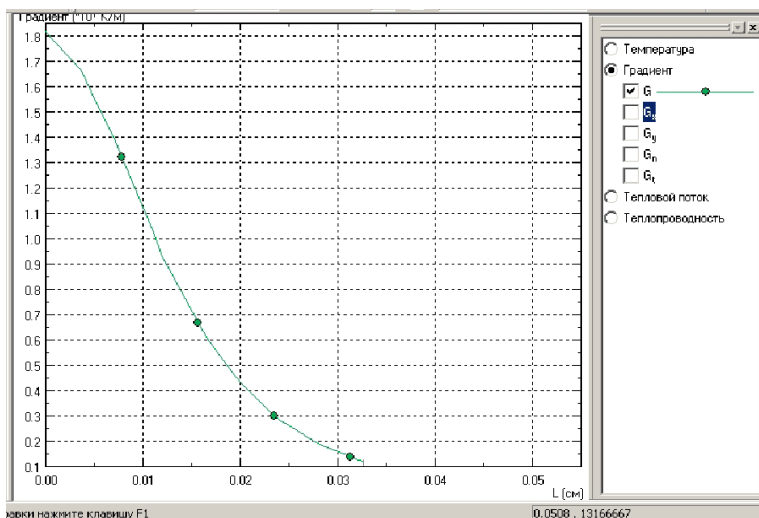


Рис. 57. График и окно «Обозначения кривых»

Для получения разных контуров и графиков нужно открывать новые окна результатов. Переключение между окнами осуществляется нажатием $\text{Ctrl} + \text{Tab}$. Если потеряется окно «Обозначения кривых», то его можно вывести, нажав на кнопку «Цветовая шкала». Некоторые

дополнительные настройки можно получить из контекстного меню на графике, запустив команду «Кривые на графике».

Таблицы

Данные точек, накрытых контуром, можно представить не только в виде графика, но и в виде таблицы. Для этого следует щелкнуть по кнопке «Таблица» в панели «Анализ результатов» или запустить, находясь в окне с графиком, контекстную команду «Таблица».

На экран будет выведена таблица (рис. 58) со всеми числовыми значениями, которые можно отобразить на графике, — линейные единицы длины контура и все рассчитанные для данного контура параметры.

Можно добавлять новую точку на конкретном расстоянии от начала контура. Для этого нужно запустить контекстную команду «Создать». Далее появится диалог, показанный на рис. 59. В нем нужно ввести расстояние от начала контура и ELCUT сам рассчитает значения всех параметров в ней.

	L [cm]	x [cm]	y [cm]	N_x	N_y	T [K]	G [K/m]	G_x [K/m]	G_y [K/m]	G_z [K/m]	G_x' [K/m]	G_y' [K/m]	G_z' [K/m]
0	0.0000	26.0870	0.0000	0.999504	0.0315070	400.000	328.575	0.785658	328.574	11.1075	328.575	328.574	11.1075
1	0.815193	26.0613	0.814788	0.999504	0.0315070	397.324	327.904	2.46611	327.895	12.7959	327.895	327.895	12.7959
2	1.63039	26.0356	1.62958	0.999504	0.0315070	394.647	327.243	4.17677	327.216	14.4843	327.216	327.216	14.4843
3	2.44558	26.0099	2.44436	0.999504	0.0315070	392.009	326.584	5.87445	326.677	16.2633	326.677	326.677	16.2633
4	3.26077	25.9842	3.25915	0.999504	0.0315070	389.383	319.537	7.03340	319.409	19.0925	319.409	319.409	19.0925
5	4.07596	25.9585	4.07394	0.999504	0.0315070	386.808	314.822	9.95993	314.664	19.8691	314.664	314.664	19.8691
6	4.89116	25.9329	4.88873	0.999504	0.0315070	384.294	308.330	11.5435	308.114	21.2435	308.114	308.114	21.2435
7	5.70667	25.9072	5.70384	0.999504	0.0315070	381.743	302.259	13.7980	301.945	23.2945	301.945	301.945	23.2945
8	6.52154	25.8815	6.51830	0.999504	0.0315070	379.368	295.584	15.8289	295.157	25.0575	295.157	295.157	25.0575
9	7.33673	25.8558	7.33309	0.999504	0.0315070	376.977	285.357	16.7311	284.066	25.6991	284.066	284.066	25.6991
10	8.15193	25.8301	8.14788	0.999504	0.0315070	374.725	275.955	17.6717	275.389	26.3396	275.389	275.389	26.3396
11	8.96712	25.8044	8.96267	0.999504	0.0315070	372.559	265.840	18.6358	265.186	26.9817	265.186	265.186	26.9817
12	9.78231	25.7787	9.77745	0.999504	0.0315070	370.428	255.249	19.3677	254.514	27.3700	254.514	254.514	27.3700
13	10.5975	25.7531	10.5922	0.999504	0.0315070	368.400	243.177	19.7323	242.375	27.3505	242.375	242.375	27.3505
14	11.4127	25.7274	11.4070	0.999504	0.0315070	366.403	231.139	19.9591	230.275	27.2045	230.275	230.275	27.2045
15	12.2279	25.7017	12.2218	0.999504	0.0315070	364.604	219.330	19.6043	218.452	26.4773	218.452	218.452	26.4773
16	13.0431	25.6760	13.0366	0.999504	0.0315070	362.928	208.002	20.0268	206.957	27.3370	206.957	206.957	27.3370
17	13.8583	25.6503	13.8514	0.999504	0.0315070	361.265	196.421	22.0453	195.180	28.1839	195.180	195.180	28.1839
18	14.6735	25.6246	14.6662	0.999504	0.0315070	359.656	184.071	23.2248	182.599	29.9644	182.599	182.599	29.9644
19	15.4887	25.5990	15.4810	0.999504	0.0315070	358.347	171.005	23.9751	169.316	29.2978	169.316	169.316	29.2978
20	16.3039	25.5733	16.2958	0.999504	0.0315070	357.039	157.979	24.7284	156.032	29.6292	156.032	156.032	29.6292

Рис. 58. Таблица по контуру

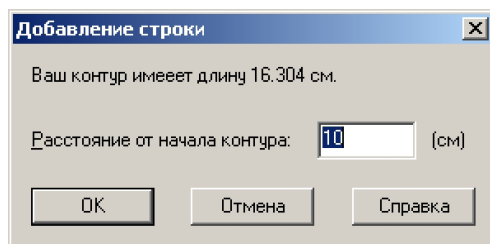


Рис. 59. Диалог ввода новой точки на контуре

Таблицы и графики во времени

В нестационарных задачах, в которых параметры меняются с течением времени, например, при нагреве, можно анализировать графики изменения различных величин во времени. Чтобы открыть новый график, находясь на картине поля, щелкните по кнопке «График» из панели инструментов «Анализ результатов».

Если же вы правым щелчком мыши по картине поля откроете контекстное меню и там выберете команду «График во времени», то появится график во времени для той точки, которую вы указали мышью.

Если, находясь на графике, запустить контекстную команду «Кривые на графике», будет выведено диалоговое окно, показанное на рис. 60, в котором можно задать координаты точки, и изменение параметра в ней будет выведено отдельной линией на общий график.

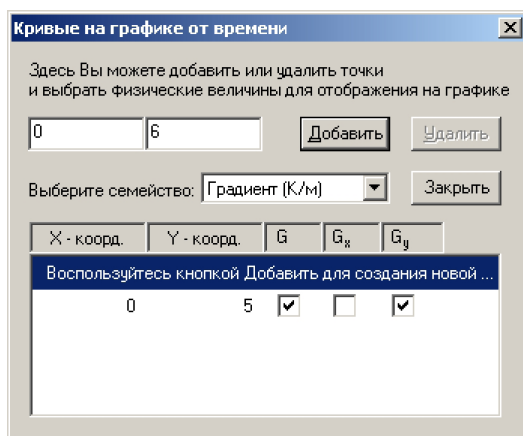


Рис. 60. Диалог для ввода координат точки для графика во времени

В окне графика во времени одновременно могут быть показаны кривые для нескольких точек. В свою очередь, для каждой точки вы можете указать индивидуальный набор физических величин (кривых на графике). Физические величины разделены на группы по их размерности, например, температура, градиент температуры и тепловой поток. Нельзя одновременно показать на одном графике изменение во времени физических величин из разных групп.

В начале создания нестационарной задачи ELCUT запрашивает временной интервал и шаг в секундах. После расчета можно вывести на график значения на выбранный момент времени согласно шагу (от 0 до 230 секунд с шагом 0,5 секунды). Выбор осуществляется из списка «Время».

Таблица во времени. Если известны координаты интересующей точки, то можно увидеть значения рассчитанных параметров во времени.

Для этого, находясь в «Таблице» (в «Таблицу» можно попасть из графика через кнопку или контекстную команду), нужно запустить контекстную команду «Таблица во времени». Появится диалог, показанный на рис. 61.

Координаты точки: x = <input type="text" value="5"/> y = <input type="text" value="10"/> <input type="button" value="OK"/>						
Время (с)	T (K)	G (K/m)	Gx (K/m)	Gy (K/m)	F (Вт/м2)	Fx (Вт/м2)
0	0	0	0	0	0	0
0.5	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04
1	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04
1.5	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04
2	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04
2.5	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04
3	291.136	165.537	165.002	13.2964	2483.06	2475.04

Рис. 61. Таблица во времени для конкретной точки

В нем в окна «x=» и «y=» нужно ввести координаты точки, нажать ОК и получить значения рассчитанных параметров для этой точки для каждого временного шага. На рис. 61 первый столбец отсчитывает секунды.

Многооконный режим работы с ELCUT

После решения задачи на экран выводится цветная картина поля, которая является стартовой точкой анализа результатов. ELCUT дает возможность открыть несколько независимых окон с полем. Это удобно, например, в том случае, когда нужно нарисовать несколько различных контуров.

Для того чтобы открыть новое независимое окно, следует щелкнуть по кнопке «Новое окно» в панели «Анализ результатов».

Если на экране в момент запуска команды «Новое окно» был какой-либо другой объект анализа, то ELCUT откроет его копию для последующего независимого редактирования.

Каждое новое окно отображается в ниспадающем меню «Окна». Перемещаться между окнами можно с помощью данного меню или нажимая $\text{Ctrl} + \text{Tab}$.

Задания к практической работе 4

1. Составить и решить задачу, показанную на рис. 51 (толщина 1 см, катеты по 2 см, теплопроводность пластины 45 Вт/К×м).
2. Вывести на экран картину поля градиента температуры.
3. Вывести на экран картину поля температуры с наложенными изотермами.
4. Вывести на экран картину поля температуры с наложенными векторами.
5. Показать температуру в точке (1; 0,5).
6. Нарисовать контур, показанный на рис. 56.
7. Вывести график изменения температуры по линии контура.
8. Вывести таблицу изменения температуры по линии контура.
9. Найти среднюю температуру по поверхности пластины (для этого нужно нарисовать замкнутый контур по ребрам треугольника).
10. Открыть новое окно с полем температуры и нарисовать контур, аналогичный показанному на рис. 56, но направленный в противоположном направлении. Построить график и таблицу значений.
11. Продемонстрировать переключение между всеми окнами задачи.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задание 1. Расчет теплового поля асинхронного двигателя

Схема сечения асинхронного двигателя показана на рис. 62, варианты заданий – в табл. 3.

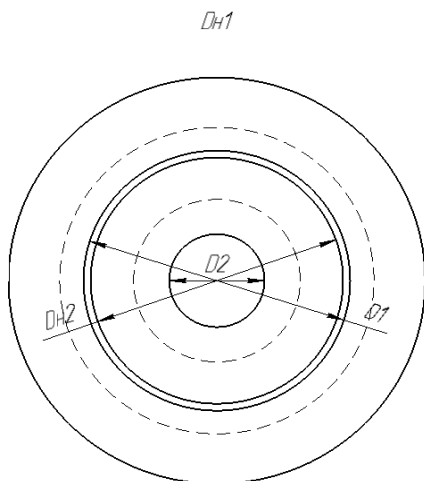


Рис. 62. Схема сечения асинхронного двигателя

Таблица 3

Варианты заданий для расчета теплового поля
асинхронного двигателя

Вариант	$D_{н1}$	D_1	$D_{н2} = D_1 - 2\delta$	$D_2 = 0,2D_{н1}$	δ
1	175	112	111,4	40	0,3
2	359	240	238,6	83	0,7
3	590	385	982,8	135	1,1
4	108	74	73,5	21,6	0,25
5	157	98	97,2	31,4	0,4
6	285	186	185	57,0	0,5
7	452	308	306,4	90,4	0,8
8	520	365	363	104	1,0

Задание 2. Расчет теплового поля трансформатора

Схема сечения трансформатора показана на рис. 63, варианты заданий – в табл. 4.

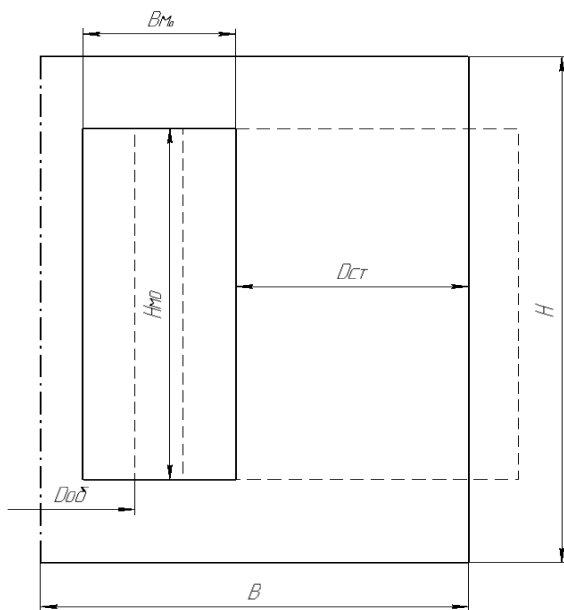


Рис. 63. Схема сечения трансформатора

Таблица 4

Варианты заданий для расчета теплового поля трансформатора

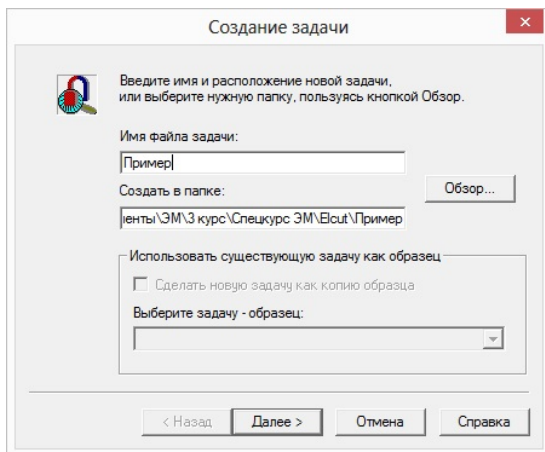
Вариант	H	B	H_{m0}	B_{m0}	$D_{ст}$	$Doб$
1	3170	3920	1610	770	780	1480
2	2920	3620	1380	520	540	1220
3	2570	3490	1150	390	400	1030
4	1020	2950	970	300	320	610
5	950	2740	810	270	290	450
6	830	1400	750	180	200	320
7	790	950	700	130	180	210
8	700	820	650	110	150	200

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

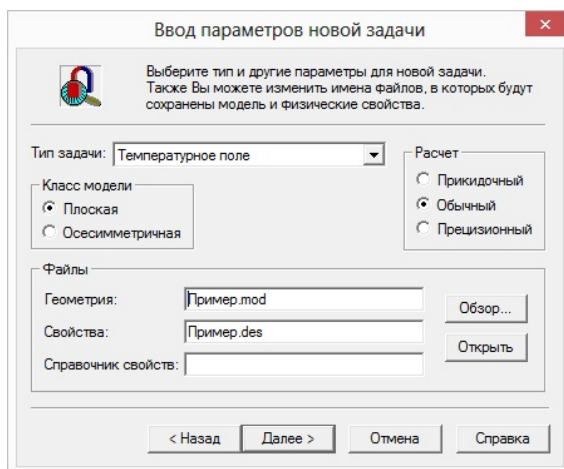
Задание 1. Смоделировать температурное поле детали класса «труба» с параметрами: радиус дуги окружности внутренней поверхности 42,5 мм, радиус дуги окружности внешней поверхности 50,0 мм.

Рассмотрим этапы и результаты выполнения.

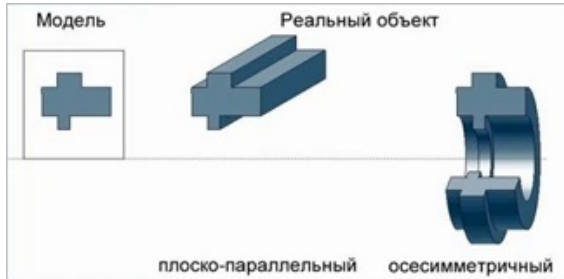
1. Создание задачи.



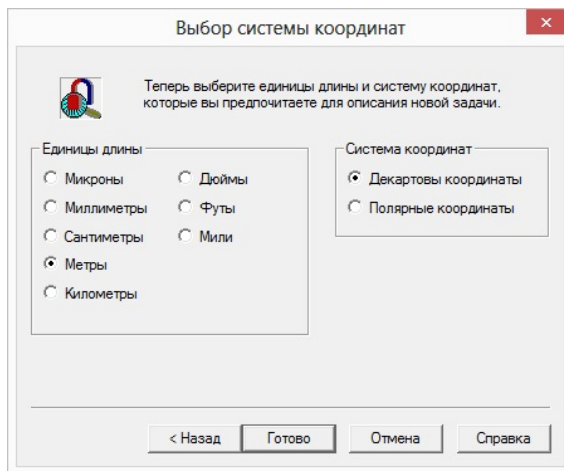
2. Ввод параметров новой задачи.



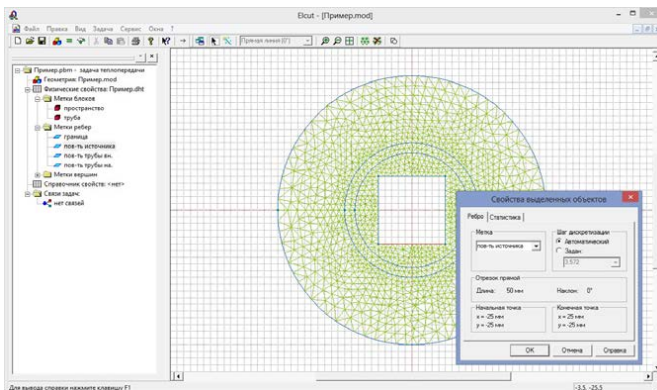
3. Выбор класса модели.

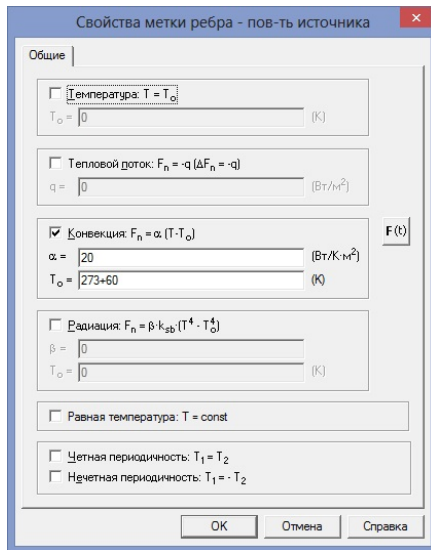


4. Выбор системы координат.

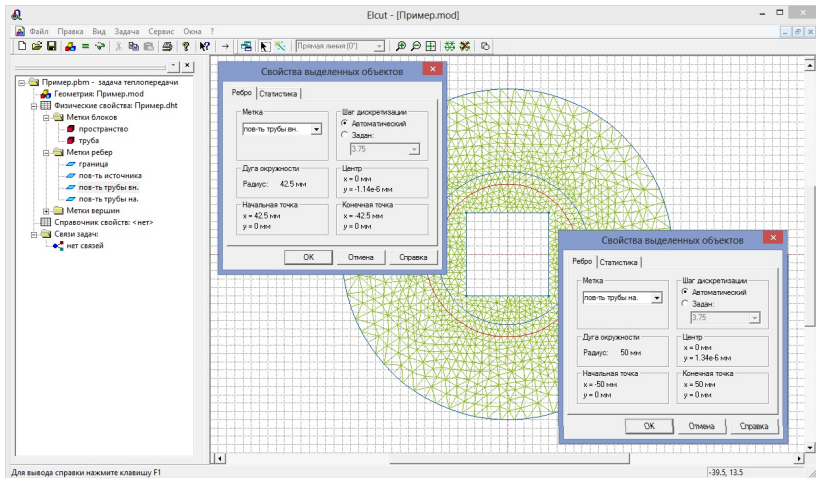


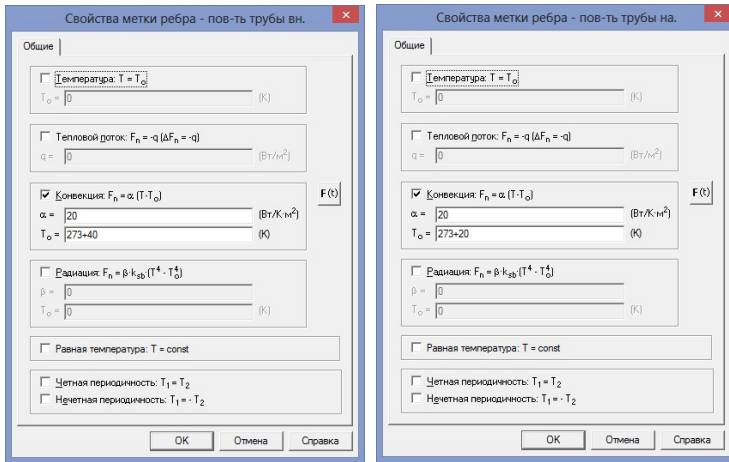
5. Задание свойств метки ребра – поверхность источника.



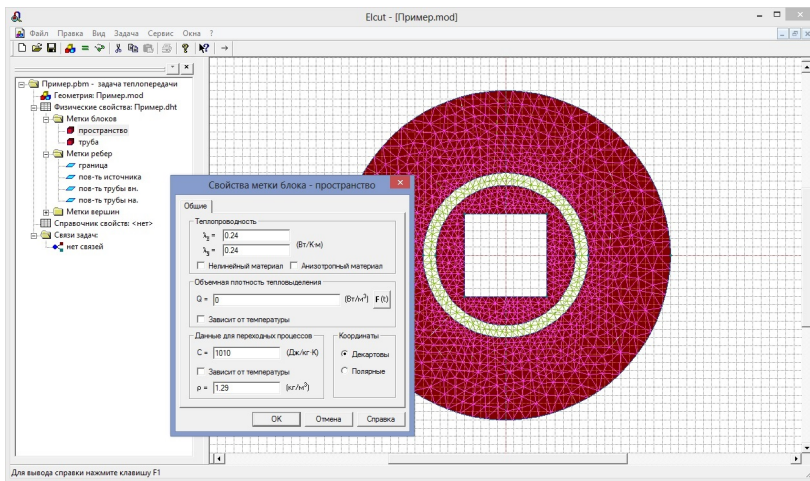


6. Задание свойств метки ребра – поверхность трубы.

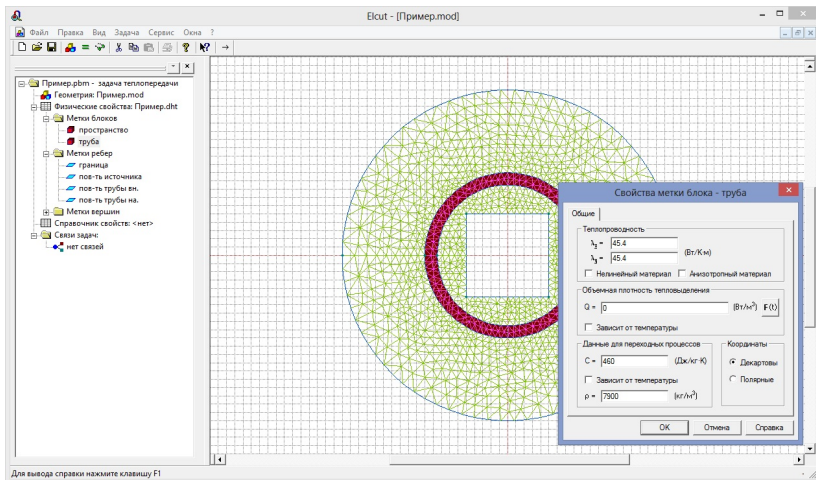




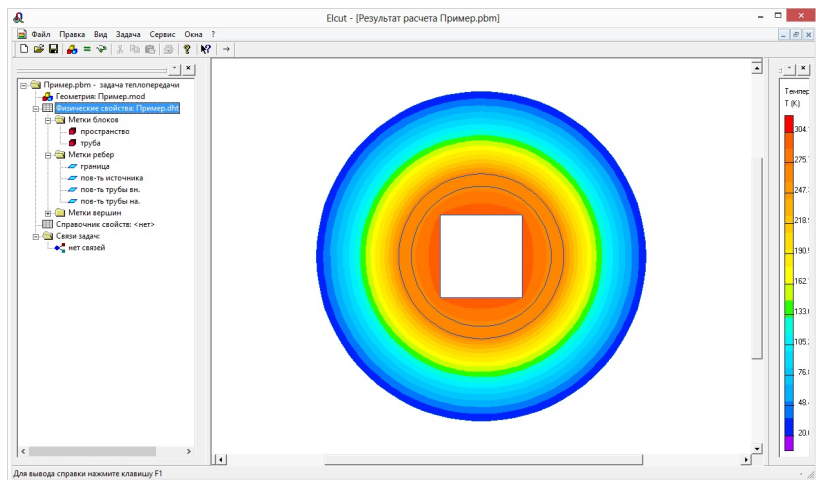
7. Задание свойств блока – воздушное пространство.



8. Задание свойств блока – труба.



9. Результат решения задачи – картина температурного поля.



Библиографический список

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив «ТОР», 2012. – 356 с.