

Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева

В статье рассматриваются вопросы применения конечно-элементного пакета ELCUT для моделирования устройств индукционного нагрева. Дается сравнительный анализ возможностей пакета и методика работы с ним при решении электромагнитных и тепловых задач. Приводится пример моделирования индукционной тигельной печи.

Задача

Моделирование устройств индукционного нагрева.

Средства

ELCUT, ANSYS, Femlab

Результаты

Проведен анализ возможностей пакетов для моделирования индукционных установок.

Подробно рассмотрен процесс моделирования в ELCUT.

Для моделирования индукционных установок более всего подходят программы расчета полей методом конечных элементов.

1. Введение

Устройствами индукционного нагрева (индукционными установками) называют электротермические устройства, предназначенные для нагрева или плавки материалов посредством воздействия на них переменным электромагнитным полем. Под действием переменного поля в нагреваемом материале наводятся вихревые токи (токи Фуко), которые и разогревают материал. Конструктивно индукционная установка обычно представляет собой индуктор (катушку), питаемый от источника переменного тока промышленной или повышенной частоты. Внутри индуктора помещается нагреваемый объект. Индукционный нагрев обладает рядом преимуществ, благодаря которым широко используется в промышленности. Это быстрота нагрева, выделение тепла только в нагреваемом объекте, пониженные затраты энергии, а также возможность автоматического управления процессом

нагрева. Нагревательные индукционные установки применяются для подготовки материалов перед ковкой, прокаткой, прессованием, для закалки, отжига, нагрева перед сваркой, для пайки, наплавки, а также для плавки черных и цветных металлов с целью получения материалов особой чистоты, однородности и точности химического состава.

Используемые в настоящее время методики проектирования таких установок являются приближенными и в большой мере основаны на использовании экспериментальных данных, что часто приводит к большим погрешностям в расчетах. В связи с этим проектирование индукционной установки должно завершаться этапом моделирования разработанной установки с целью проверки ее характеристик. Для моделирования индукционных установок более всего подходят программы расчета полей методом конечных элементов (МКЭ).

2. Обзор основных компьютерных пакетов исследования полей на основе МКЭ

Среди существующего многообразия программных продуктов, предназначенных для решения полевых задач, можно выделить три универсальных пакета такого рода. Во-первых, это ANSYS — один из самых мощных пакетов конечно-элементного анализа, во-вторых, Femlab — интегрируемый в MATLAB новейший пакет для решения полевых задач, и, в-третьих, ELCUT — практически единственный отечественный пакет (разработчик — производственный кооператив «ТОР»), пригодный для моделирования устройств индукционного нагрева. Все три пакета являются универсальными (предназначены для решения различных типов полевых задач), позволяют решать линейные и нелинейные задачи и обладают примерно одинаковой точностью и возможностями. Основные отличия пакетов представлены в табл. 1.

Пакет ANSYS обладает наибольшим числом достоинств. Это единственный пакет среди перечисленных, позволяющий моделировать переход материала из твердого состояния в жидкое и наоборот (фазовый переход), что особенно важно при моделировании процесса расплавления металла в индукционных печах. Однако сложность интерфейса программы, большое число параметров ее настройки и почти полное отсутствие учебников по программе на русском языке затрудняют ее использование.

Таблица 1

№	Возможности пакета	ANSYS	Femlab	ELCUT
1	<i>Вид анализа:</i>			
	Электромагнитный	да	да	да
	Тепловой	да	да	да
	Гидрогазодинамический	да	да	нет
	Механический	да	да	да
2	<i>Тип расчета:</i>			
	Совмещенный (мультифизичный)	да	да	только последовательный
2	Статический	да	да	да
	Динамический	да	да	только для тепловых задач
3	<i>Геометрическая модель:</i>			
	Двухмерная	да	да	да
	Осесимметричная	да	да	да
3	Трехмерная	да	да	нет
	Выбор типа конечного элемента	да	нет	нет
5	Возможность задавать энтальпию как параметр материала	да	нет	нет
6	Возможность моделирования внешних электрических цепей	да	да (экспорт в Simulink)	нет

Пакет Femlab обладает почти такими же возможностями, как и пакет ANSYS. Его интерфейс достаточно прост и понятен. Кроме этого Femlab, по сути, является инструментом (Toolbox) пакета MATLAB и работает под его управлением. Это означает, что все возможности программирования, доступные в MATLAB, могут быть использованы и в Femlab (например, при обработке результатов расчета). Еще одним огромным достоинством Femlab является возможность экспорта конечно-элементной модели в Simulink (инструмент моделирования динамических систем, встроенный в MATLAB). Это позволяет моделировать не только простейшие внешние электрические цепи, но и работу установки совместно с преобразователями электрической энергии, системами управления; исследовать частотные характеристики и устойчивость электротехнологической установки и т. п. Но так же как и для первого пакета, для Femlab в настоящий момент отсутствует документация на русском языке, что значительно сдерживает его применение.

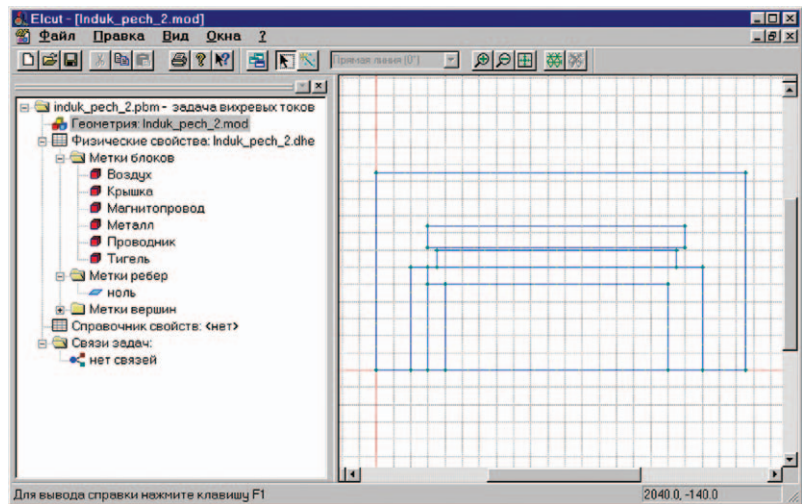
Среди рассматриваемых программ ELCUT, на первый взгляд, обладает ограниченными возможностями. Однако некоторые ограничения достаточно легко преодолеваются. Например, ELCUT не позволяет моделировать трехмерные объекты, однако устройство индукционного нагрева, с точки зрения геометрии, является обычно телом вращения, а осесимметричные задачи с помощью ELCUT могут решаться. Наиболее серьезным недостатком ELCUT является то, что в

этой программе на сегодняшний день отсутствует возможность одновременно решить нескольких полевых задач (например, элект-

Преимуществом пакета ELCUT является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, большое количество примеров, поставляемых с программой, развитые возможности по обработке результатов расчета, а также наличие распространяемой бесплатно студенческой версии программы. ELCUT незаменим при изучении методики решения полевых задач.

ромагнитной и тепловой). Это не позволяет автоматически учитывать изменение свойств материалов в процессе расчета. К примеру, нельзя учесть изменение магнитной проницаемости нагреваемого установкой металла при изменении его температуры. Данный недостаток можно частично преодолеть, разбив временной отрезок, на котором производится тепловой расчет, на несколько отдельных участков. На каждом из таких участков необходимо предварительно решать электромагнитную задачу с новыми значениями свойств материалов.

Преимуществом же ELCUT безусловно является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, большое количество примеров, поставляемых с программой, развитые возможности по обработке результатов расчета (расчет индуктивностей, емкостей, усилий и т. п.), а также наличие распространяемой бесплатно студенческой версии программы. Это делает ELCUT незаменимым именно при изучении методики решения полевых задач, поскольку при обучении с использованием англоязычных программ трудности освоения интерфейса программы накладываются на ошибки создания моделей и, таким образом, делают процесс обучения абсолютно неэффектив-



ным. Русскоязычный же интерфейс программы позволяет сосредоточиться на изучении собственно процесса моделирования.

▲ Рис. 1. Окно программы ELCUT на этапе создания модели.

3. Главное окно программы ELCUT

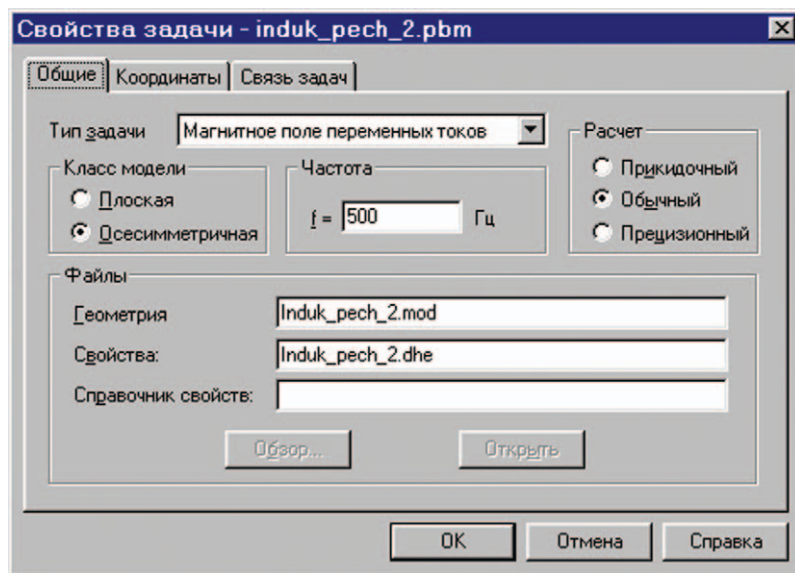
Главное окно программы на этапе создания модели представлено на рис. 1. Окно содержит заголовок с названием программы и именем файла модели, меню со списком команд для управления работой программы, панель инструментов (кнопки, соответствующие наиболее часто используемым командам меню). Ниже панели инструментов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

жается 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.

4. Основные этапы построения моделей в программе ELCUT

Решение полевой задачи сводится к нескольким последовательным шагам:

- выбор типа решаемой задачи (поле переменных токов, нестационарная теплопередача, электростатика, магнитостатика и т. д.);
- выбор класса задачи (плоская или осесимметричная; осесимметричная задача выбирается, если моделируемый объект является телом вращения: цилиндрическая заготовка, труба, соленид и т. д.);
- создание геометрической модели (чертежа объекта);
- задание свойств материалов (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность и т. д.);
- задание нагрузок (величины токов, мощности тепловыделения и т. д.);
- задание граничных условий (величины потенциалов поля на границах расчетной области, значения температур на границах и т. д.);
- построение сетки конечных элементов;
- решение задачи;
- обработка результатов решения (построе-



▲ Рис. 2. Окно диалога «Свойства задачи».

ние цветowych карт, графиков изменения переменной по какому либо контуру, расчет интегральных значений и т. д.)

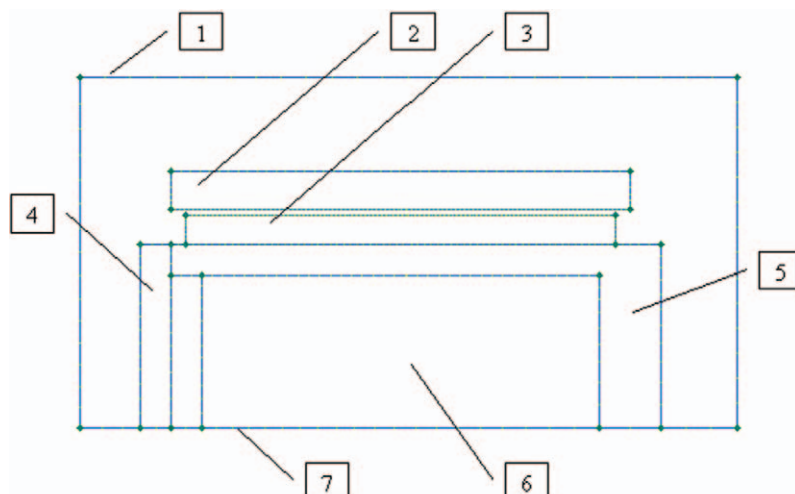
4.1. Выбор типа решаемой задачи

На первом этапе производится выбор типа решаемой задачи. При моделировании индукционных электротехнологических устройств базовой задачей является задача расчета электромагнитного поля переменных токов (вихревых токов). Решение этой задачи позволяет определить картину распределения мощности тепловыделения в нагреваемом элементе, которая средствами пакета передается затем в подчиненную задачу нестационарной теплопередачи для расчета процесса нагрева.

На этом же этапе выбирается класс модели (геометрические свойства модели). Рассчитываемая модель может быть плоской (двумерной) или осесимметричной (телом вращения). Устройства индукционного нагрева (индукционная тигельная печь, установка для нагрева цилиндрических заготовок и т. п.), как правило, являются телами вращения, благодаря чему при решении задачи в двумерной постановке решение фактически находится для трехмерной задачи.

На рис. 2 показано окно «Свойства задачи», ра-

▼ Рис. 3. Геометрическая модель ИТП:
1 — граница расчетной области;
2 — магнитопровод;
3 — обмотка;
4 — крышка тигля;
5 — тигель;
6 — металл;
7 — ось симметрии.



бота с которым производится на первом этапе создания модели.

На данном этапе также выбираются единицы измерения координат. Пользователь может выбрать в качестве единиц измерения не только метры, но и сантиметры, миллиметры и другие внесистемные единицы, что упрощает последующую процедуру создания геометрической модели. Результаты расчета, тем не менее, будут представлены в системе единиц СИ.

Вкладка «Связь задач» в рассматриваемом окне диалога предназначена для указания базовых задач, передающих результаты в подчиненную задачу. Применительно к процессу нагрева передаваемыми данными могут быть распределения мощности тепловыделения или температуры.

4.2. Создание геометрической модели

Геометрическая модель фактически является чертежом моделируемого объекта. На рис. 3 показан пример такой геометрической модели. В качестве примера здесь и далее рассматривается индукционная тигельная печь (ИТП). На рисунке печь расположена горизонтально, поскольку осью симметрии в ELCUT может быть только горизонтальная ось.

Процедура создания геометрической модели достаточно проста и во многом напоминает работу с обычным графическим редактором. Для облегчения создания модели окно геометрии содержит координатную сетку, по узлам которой проводятся прямые линии (ребра). В программе также есть инструменты для вычерчивания окружностей и дуг. Возможность произвольного изменения масштаба изображения, инструменты копирования, поворота и перемещения геометрических объектов значительно облегчают данную процедуру.

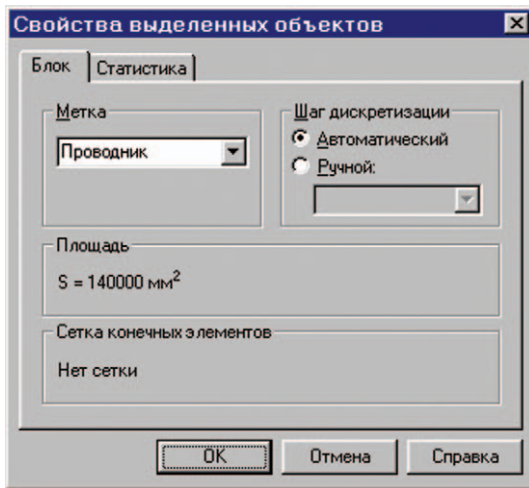
При создании геометрической модели следует избегать излишней детализации, поскольку наличие мелких деталей потребует частой сетки конечных элементов, что приведет к значительным временным затратам при решении задачи либо даже к невозможности ее решения.

На этом же этапе отдельным геометрическим элементам (блокам) модели присваиваются метки. Метки необходимы для связи между геометрическими объектами и моделями физических свойств этих объектов. Метки могут быть присвоены блокам модели (для связи блоков с моделями материалов, из которых они изготовлены), ребрам, или, иначе, границам блоков, а также отдельным узлам (для задания граничных условий).

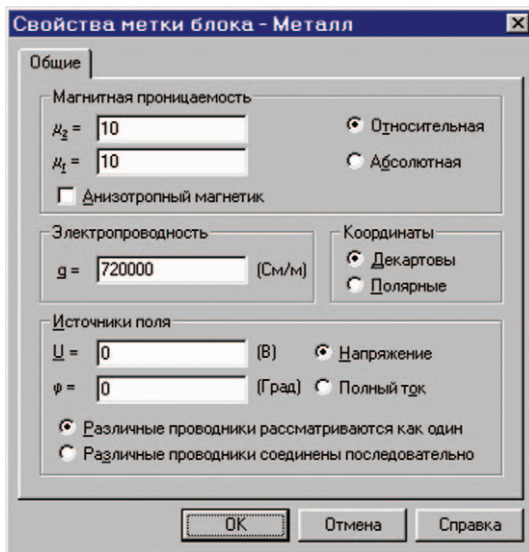
На рис. 4 показано окно свойств блока, моделирующего обмотку индуктора тигельной печи. Кроме метки блока в таком окне можно задать шаг дискретизации (разбиения) области на конечные элементы, а также на вкладке «Статистика» просмотреть свойства геометрической модели.

4.3. Задание свойств материалов

Физические свойства материалов (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность и т. д.) задаются в окне свойств метки блока. На рис. 5 показан пример окна диалога, с помощью которого задаются свойства материала. В данном примере заданы электромагнитные свойства расплавляемого металла.



▲ Рис. 4. Окно свойств блока на этапе присвоения метки.



▲ Рис. 5. Ввод характеристик материалов.

Для тепловых задач ELCUT позволяет задавать нелинейные свойства материалов (зависимость теплопроводности от температуры). Соответствующее окно параметров имеет флажок «Нелинейный материал», установив который, можно открыть окно специального редактора и задать в нем кривую зависимости теплопроводности от температуры.

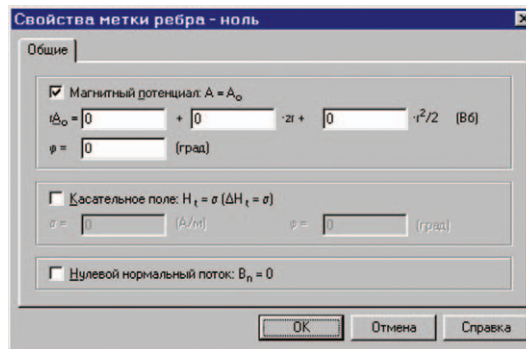
5. Задание нагрузок

Нагрузки (величины токов, мощности тепловыделения и т. д.) также задаются в окне свойств метки блока. Величина тока в обмотке задается в графе «Источники поля» (см. рис. 5). В этом же окне можно задать начальную фазу тока в обмотке. Для того чтобы смоделировать многофазную обмотку, необходимо в геометрической модели создать соответствующие обмотки, присвоив им разные метки, и затем задать разные начальные фазы токов в каждой обмотке.

6. Задание граничных условий

Граничные условия (величины потенциалов поля на границах расчетной области, значения температур на границах и т. д.) задаются в окне свойств меток ребер.

На рис. 6 показано окно диалога, с помощью которого задаются свойства границы расчетной



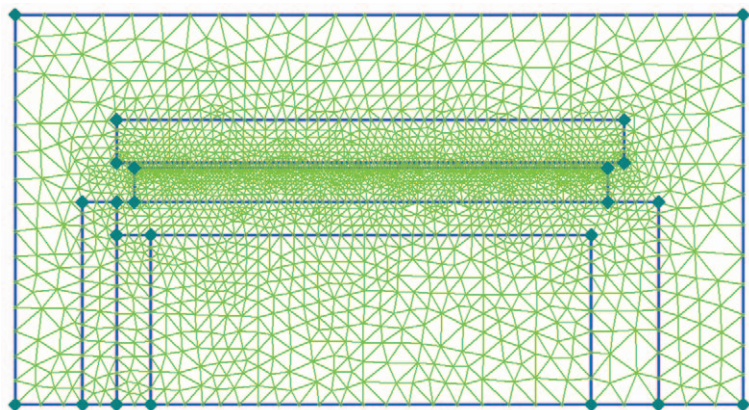
▲ Рис. 6. Ввод граничных условий.

области. В рассматриваемом примере величина магнитного потенциала на границе расчетной области (и, следовательно, за ее пределами) равна нулю.

7. Построение сетки конечных элементов

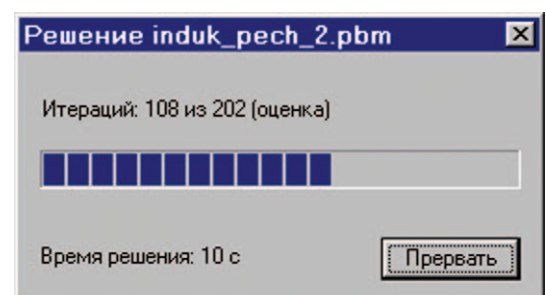
Построение сетки осуществляется с помощью команды «Построить сетку» из меню программы. Шаг сетки выбирается программой автоматически, исходя из размеров геометрических элементов, однако имеется также возможность вручную установить шаг дискретизации (разбивки) для выделенной геометрической области, ребра или узла. Установка шага дискретизации вручную (его уменьшение) может потребоваться для увеличения точности расчета в какой-либо области модели. Увеличение шага дискретизации требуется, как правило, при работе со студенческой версией программы (для которой установлено ограничение в 200 узлов сетки) либо для уменьшения времени расчета в профессиональной версии программы. Геометрическая модель с построенной конечно-элементной сеткой показана на рис. 7.

▼ Рис. 7. Геометрическая модель с конечно-элементной сеткой.



8. Решение задачи

Решение задачи выполняется с помощью команды «Решить задачу» из меню «Правка» программы. В процессе решения имеется возможность наблюдать за ходом решения с помощью специального окна «Решение» (см. рис. 8).



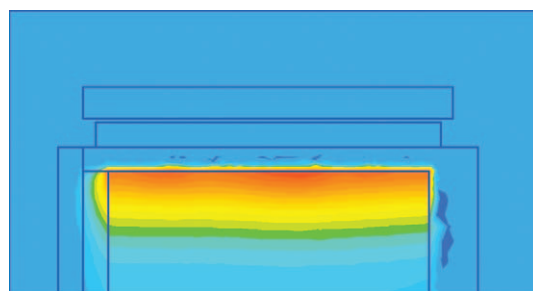
▲ Рис. 8. Окно, отображающее ход решения.

9. Обработка результатов решения

Решение задачи в программе ELCUT представляет собой картину поля какой-либо из рассчитанных переменных. Для электромагнитной задачи это может быть индукция, напряженность магнитного поля, плотность тока, мощность тепловыделения и т. п. Для тепловой задачи рассчитанными величинами являются поля температур и градиента температур, поле теплового потока. Картина поля может быть представлена цветовой картой, когда отдельному диапазону отображаемой переменной ставится в соответствие определенный цвет таким образом, что малые величины отображаются синим цветом, а большие — красным (см. рис. 9, 10). Картина поля может быть представлена и с помощью линий равного уровня и векторного поля.



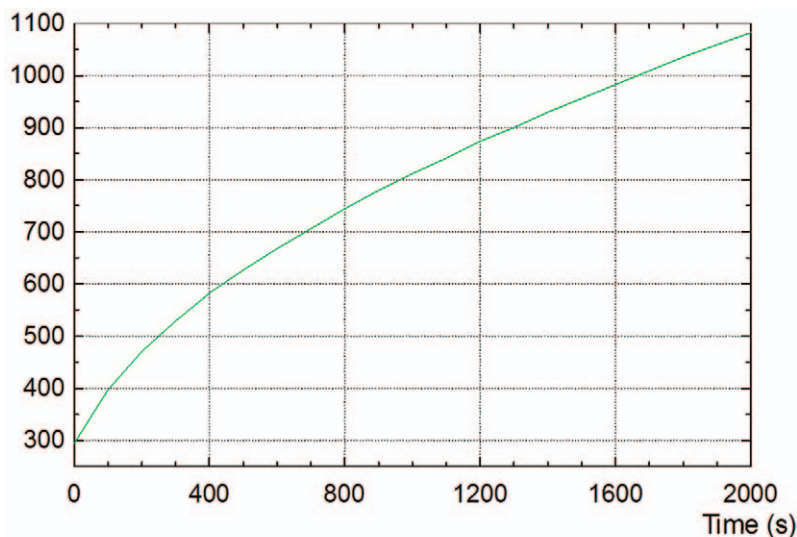
► Рис. 9. Распределение мощности тепловыделения.



► Рис. 10. Картина температурного поля.

На изображении картины поля с помощью мыши можно выбрать любую точку для просмотра значений переменных в этой точке, также легко можно построить график изменения переменной вдоль какого-либо отрезка (контура). Для этого предварительно с помощью мыши необходи-

▼ Рис. 11. Изменение температуры расплавляемого металла.



мо нарисовать такой контур на картине поля, а затем с помощью команды из меню программы построить график.

Для расчета интегральных значений в программе ELCUT имеется специальный инструмент «Интегральный калькулятор», вычисляющий интеграл требуемой переменной в области, охваченной предварительно заданным контуром. Такими интегральными значениями могут быть средняя температура, мощность тепловыделения, тепловой поток, энергия магнитного поля, магнитный поток, объем, площадь поверхности и т. п.

В программе имеется также специальный инструмент «Мастер импеданса», с помощью которого можно определить полное сопротивление обмотки индуктора на заданной частоте. Такой инструмент оказывается весьма полезным, если необходимо определить схему замещения печи с учетом загрузки для выбора источника питания обмотки печи.

При решении задачи нестационарной теплопередачи (динамической тепловой задачи) картина теплового поля находится для каждого заданного момента времени. По результатам расчета можно построить картину поля температур (или другой рассчитанной переменной) для любого момента времени. На рис. 10 показано температурное поле в начале процесса нагрева. Дополнительно в рассматриваемой задаче можно построить графики изменения переменных во времени для любой точки модели. На рис. 11 в качестве примера показан график изменения температуры металла в точке, близкой к стенке тигля в его средней части.

10. Заключение

Пакет ELCUT позволяет проводить полноценное моделирование устройств индукционного нагрева, обеспечивая хорошую точность и быстроту решения поставленной задачи. Русскоязычный интерфейс программы делает пакет ELCUT незаменимым при изучении методики решения полевых задач методом конечных элементов.

Литература

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. — СПб.: Производственный кооператив TOP, 2000.— 130 с.



Автор:

Черных Илья Викторович,
доцент, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электро-технологических систем; Уральский государственный технический университет, г. Екатеринбург

Новости о пакете ELCUT от
Производственного Кооператива
TOP см. на стр. 19