

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ELCUT 4.2T**

*Методические указания к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Методы расчета электромагнитных и тепловых полей»
для студентов дневной формы обучения специальности
180500 – Электротехнологические установки и системы*

УДК 681.3

Составитель В.Э. Фризен

Научный редактор проф., д-р техн. наук Ф.Н. Сарапулов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ELCUT 4.2; Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине “Методы расчета электромагнитных и тепловых полей”/ В.Э. Фризен. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2003. 27 с.

В методических указаниях приведено задание на проектирование индукционного нагревателя. Даны рекомендации по составлению математической модели процесса индукционного нагрева в программном комплексе Elcut 4.2T. В приложениях приведены варианты заданий, удельные параметры нагреваемого металла, пример расчета.

Методические указания предназначены для студентов очной формы обучения специальности 180500 «Электротехнологические установки и системы».

Библиогр.: 4 назв. Табл.: 2. Рис.: 14.

Подготовлено кафедрой «Электротехника и электротехнологические системы»

УДК 681.3

ГОУ ВПО «Уральский государственный
технический университет» - УПИ, 2003

Задание на проектирование

1. Технологические требования

Толщина слоя под закалку	$\delta = 1 \text{ мм}$
Температура поверхности изделия в конце нагрева	$t_{\text{кон}} = 750 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Перепад температур в слое под закалку	$\Delta t \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Время нагрева	$\tau_{\text{нагр}} \leq 25 \text{ с}$
Режим нагрева	"по теплопроводности"

2. Технические требования

Индуктор получает питание через согласующий трансформатор от стабилизированного источника тока повышенной частоты. Ток в первичной обмотке трансформатора может регулироваться в диапазоне от 2 до 50 А. Частота источника 100 кГц. Форма кривой тока – чистая синусоида.

Величина тока в индукторе лежит в пределах 3.. 10 кА.

Зазор между индуктором и нагреваемой заготовкой от 2 до 5 мм.

3. Рекомендации по выполнению расчетов

На данной частоте глубина проникновения токов в холодную сталь составляет примерно 0.25 мм. В процессе нагрева изменяются свойства слоев металла (удельное сопротивление, теплопроводность, теплоемкость и др.), поэтому нагреваемый металл целесообразно разбить на слои в зоне нагрева. На глубине проникновения необходимо выделить два слоя равной толщины (для учета насыщения стали в зоне выделения максимальной полезной мощности). Для учета изменения тепловых свойств стали, а также более точного построения кривой насыщения в металле выделим еще 4-5 слоев за первыми двумя. Толщина слоев при удалении от поверхности металла возрастает в

геометрической прогрессии. Например, третий слой в 3 раза больше второго, четвертый в 3 раза больше третьего и т.д. Суммарная толщина слоев должна быть в 5-10 раз больше глубины проникновения токов в металл, так как в процессе нагрева величина глубины проникновения увеличивается. В процессе расчета будем дискретно (по шагам) изменять свойства слоев с ростом температуры.

Требуется провести не менее пяти шагов расчета (табл. 1).

Таблица 1

Шаг расчета	Температура поверхности в конце нагрева, °С/К
1	200/473
2	400/673
3	600/873
4	700/973
5	750/1023

Задачу нестационарной теплопередачи, в принципе, необходимо рассматривать как нелинейную, так как теплоемкость и теплопроводность металла зависят от температуры. Однако в этом случае время расчетов многократно возрастает, и такая задача не всегда имеет решение (итерационный процесс не сходится, и в этом случае необходимо уменьшить шаг расчета по времени). В случае если требуемый шаг расчета по времени получается очень маленьким (больше десяти точек за один шаг), проще с целью экономии машинного времени каждый раз при смене шага расчета вводить новые значения теплопроводности и теплоемкости в метки блоков слоев металла.

На время расчетов значительное влияние оказывают:

1. частота источника электромагнитного поля в задаче магнитного поля переменных токов;
2. количество блоков с отличными от нуля значениями теплоемкости и плотности.

Для минимизации времени расчетов выставляем "прикидочный" режим в обеих задачах, а в задаче нестационарного теплообмена исключаем теплообмен внешней поверхности нагреваемого металла с окружающей средой, так как нагрев происходит относительно быстро и потери во внешнюю среду незначительны.

Для того чтобы исключить индуктор из расчетов поля температур, на границах индуктора присваиваем ребрам метки с граничным условием заданной температуры. В метке блока с медью индуктора задаем нулевым значением теплоемкости и плотности.

Воздух, окружающий нагреваемую заготовку и индуктор, также желательно исключить из расчетов поля температур при нестационарном теплообмене. Для этого на внешней границе металла задаем свойства метки ребер, соответствующие граничному условию нулевого теплового потока через границу. В этом случае теплообмен между поверхностью металла и воздухом будет отсутствовать.

Тем не менее, хотя "воздух" и "индуктор" исключены из тепловых расчетов в свойствах меток, соответствующих этим блокам, необходимо указать конечное значение теплопроводности. Значение, в принципе, может быть любым (рекомендуется $\lambda = 1$). В этом случае в "воздухе" за ребром с присвоенным граничным условием нулевого теплового потока будет наблюдаться некоторое распределение температур. Здесь следует понимать, что формирование картины температур в блоке с неизвестными температурами и заданной величиной теплопроводности (в данном случае блок с меткой "воздух") обеспечивается только введенным граничным условием. Иными словами, поле температур в "воздухе", не отражая реальной картины распределения, подстраивается к рассчитанной с наибольшей точностью реальной картине температур в слоях металла.

Поскольку в связанных расчетах необходимо пользоваться одним файлом модели (*.mod), метки с введенными граничными условиями нулевого теплового потока и заданной температуры должны присутствовать под теми же именами и в электромагнитном расчете и для них также должны быть записаны граничные условия. В данном случае уместно задать однородное граничное условие Неймана ($H_t = 0$), которое является естественным для границ блоков без метки.

4. Порядок расчетов

На каждом шаге необходимо провести связанный расчет задач магнитного поля переменных токов и нестационарной теплопередачи. При этом необходимо определить начальные условия моделирования:

1. Необходимо определить начальную магнитную проницаемость слоев металла. Для этого проводим пробный расчет электромагнитного поля в слоях, подставляя значения магнитной проницаемости примерно в соответствии с кривой намагничивания. Считаем, что напряженность поля на поверхности металла составляет $\sim 10^3 \cdot 10^4$ А/м, а на глубине проникновения токов в холодный металл $\sim 0.5 \cdot 1$ А/м. После проведения пробного расчета определяем средние напряженности поля в слоях металла и корректируем магнитные проницаемости слоев. Для сокращения объема вычислений будем считать, что магнитная проницаемость слоев за время нагрева остается неизменной.
2. Для задачи нестационарной теплопередачи необходимо задаться начальной температурой. Для этого проводим расчет температурного поля с мощностью тепловыделения во всех блоках модели, равной нулю, и заданной величиной температуры (293°К) на всех ребрах с метками. Связываем полученную задачу с задачей нестационарной теплопередачи на первом шаге.

В итоге схема связанных расчетов будет выглядеть так, как показано на рис. 1. Для удобства дальнейшей работы с моделью на каждом из шагов расчета создаем новые файлы задач и сразу связываем их между собой в соответствии со схемой.

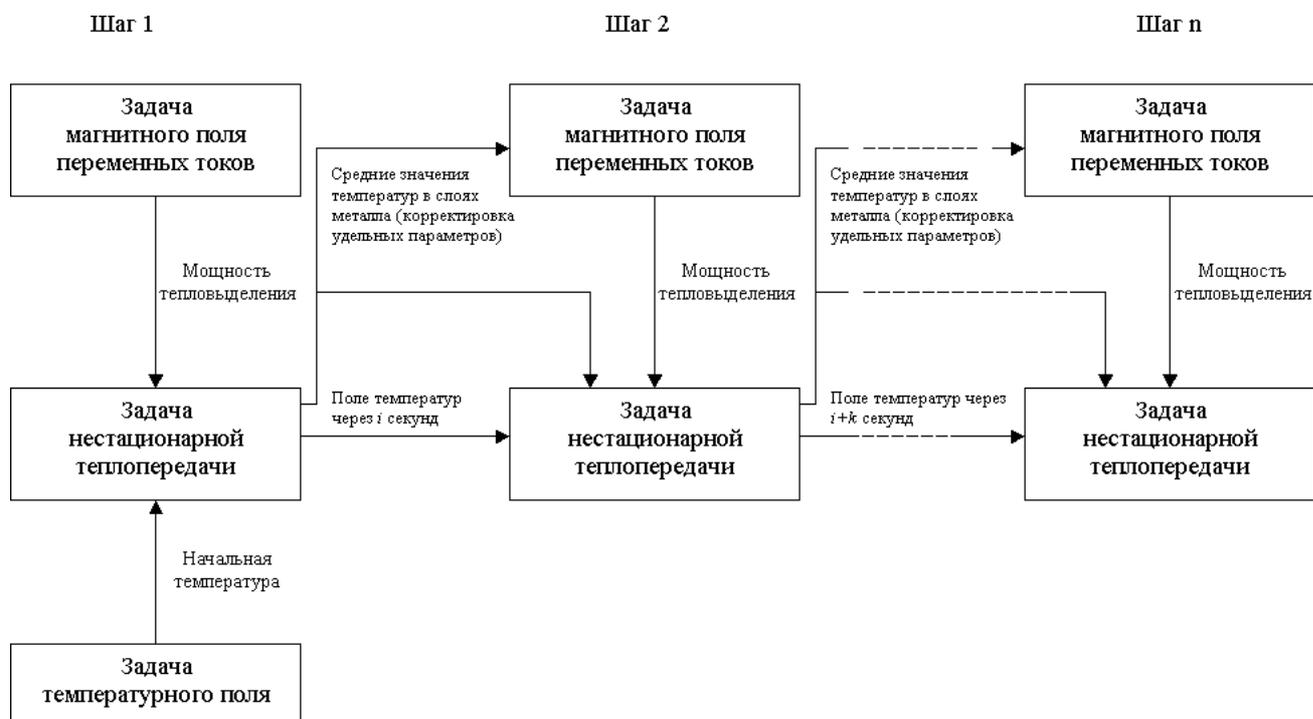


Рис. 1. Схема выполнения связанных расчетов

5. Требования к оформлению отчета

В отчет вносятся следующие данные и показатели.

1. Исходные данные:

- геометрическая модель;
- удельные свойства материалов;
- технологические параметры нагрева (режим, время);
- параметры преобразователя частоты;
- таблица удельных параметров материалов слоев на каждом из шагов расчета.

2. Рассчитанные величины:

- подобранное значение тока в индукторе, число витков и ток в первичной обмотке согласующего трансформатора (во вторичной обмотке – 1 виток);
- графики нагрева: $t(z, \tau)$ – требуется построить либо трехмерный график, либо семейство кривых $t(\tau)$ в различных слоях. Здесь следует показать конечный перепад температур на слое под закалку;
- картина электромагнитного поля на начальном этапе нагрева, значения напряженности магнитного поля в слоях металла и усредненные для слоя присвоенные значения магнитной проницаемости;
- картина температур в конце нагрева;

е. графики изменения мощности:

- полезной $P_{\text{пол}} = f(z, \tau)$,
- полезной суммарной $P_{\text{пол } \Sigma} = f(\tau)$,
- потерь в индукторе $P_{\text{пот и}} = f(\tau)$,
- потерь в экране $P_{\text{пот э}} = f(\tau)$.

3. Эскиз индуктора и экранов на листе формата А4.
4. Заключение по работе.

Библиографический список

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2000. 130 с.
2. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. 2-е изд., перераб. и доп. М.;Л.: Энергия, 1965. 522 с.
3. Лозинский М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: АН СССР, 1958. 472 с.
4. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

Варианты заданий

Вид геометрической модели выбирается по первой букве фамилии:

Вариант 1 – А, Ж, Н, У, Ч

Вариант 2 – Б, З, О, Ф, Ш

Вариант 3 – В, И, П, Х, Щ

Вариант 4 – Г, К, Р, Ц, Э

Вариант 5 – Д, Л, С, Ю

Вариант 6 – Е, М, Т, Я

Размеры модели выбираются по таблице, приведенной в каждом из вариантов заданий. Номер подварианта соответствует сумме цифр дня рождения.

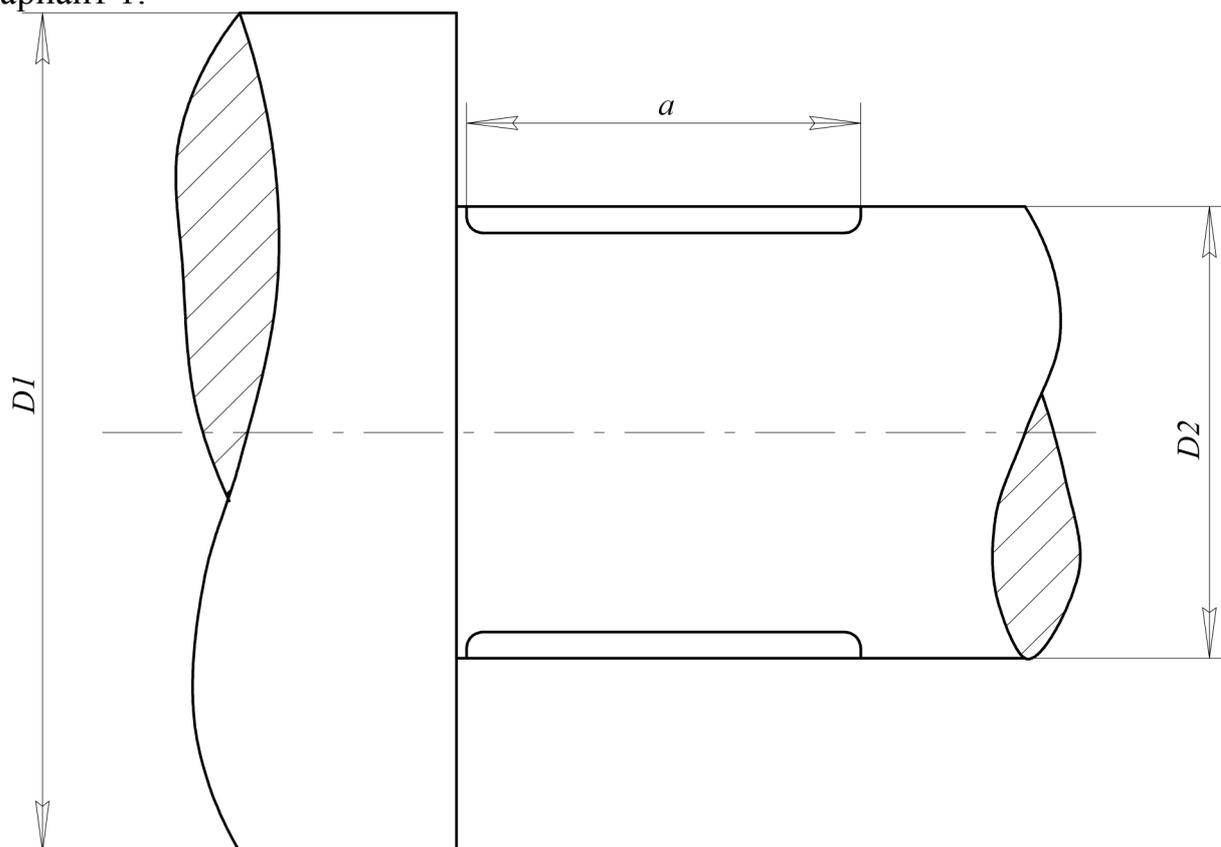
Например:

Иванов Алексей Петрович, 29 февраля 1980 г. – Вариант № 3-11

Сидоров Иван Александрович, 16 марта 1979 г. – Вариант № 5-7

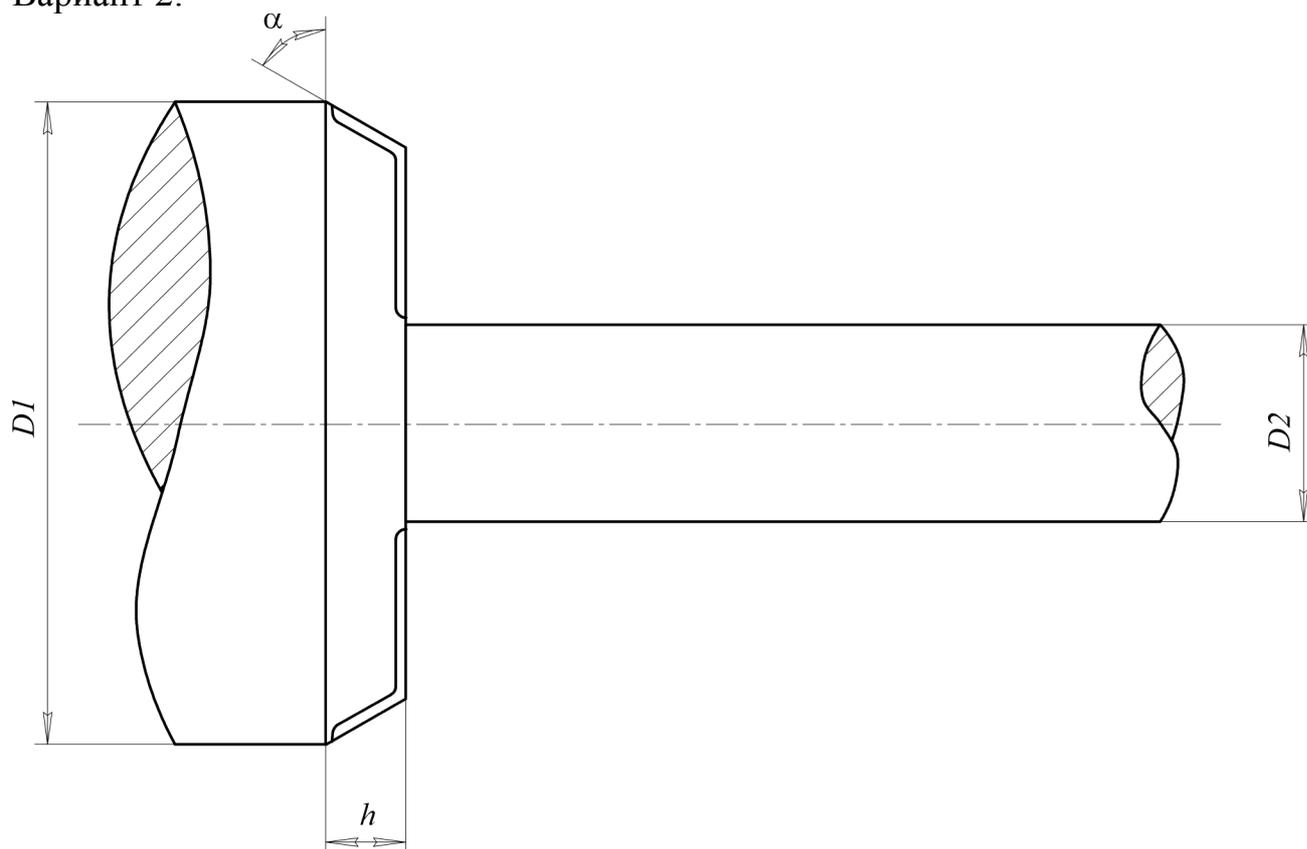
Орлов Сергей Иванович, 9 апреля 1982 г. – Вариант № 2-9

Вариант 1.



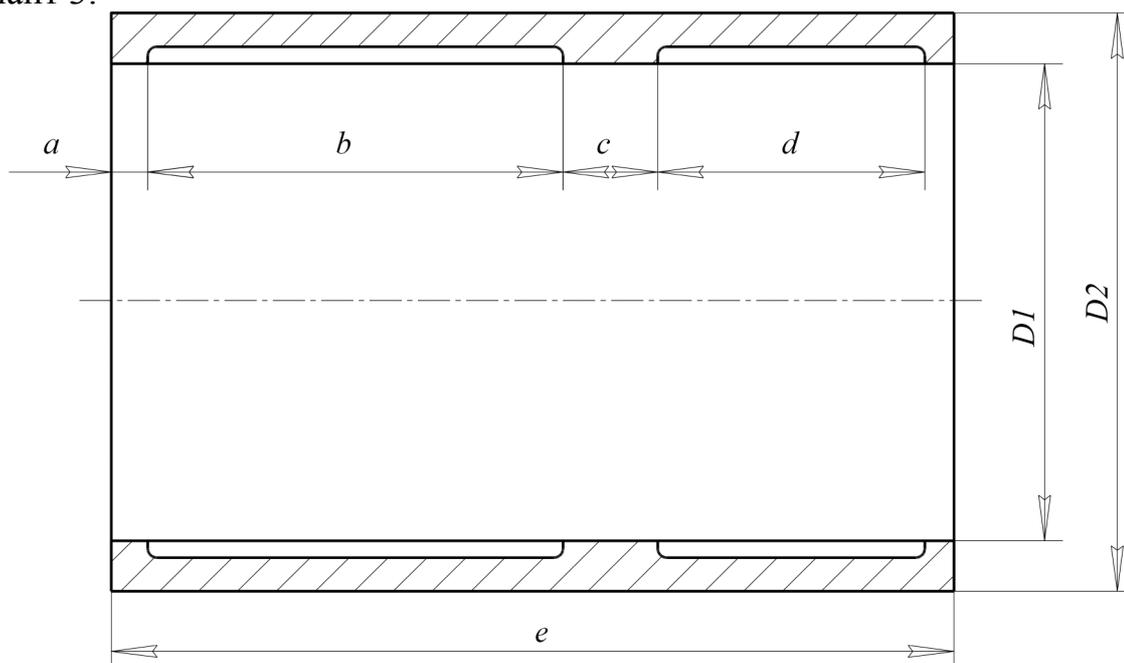
№	$D1$, мм	$D2$, мм	a , мм
1	40	10	10
2	38	11	11
3	36	11	11
4	34	12	15
5	32	13	15
6	33	12	15
7	35	11	14
8	37	11	20
9	39	10	20
10	41	11	15
11	45	12	15

Вариант 2.



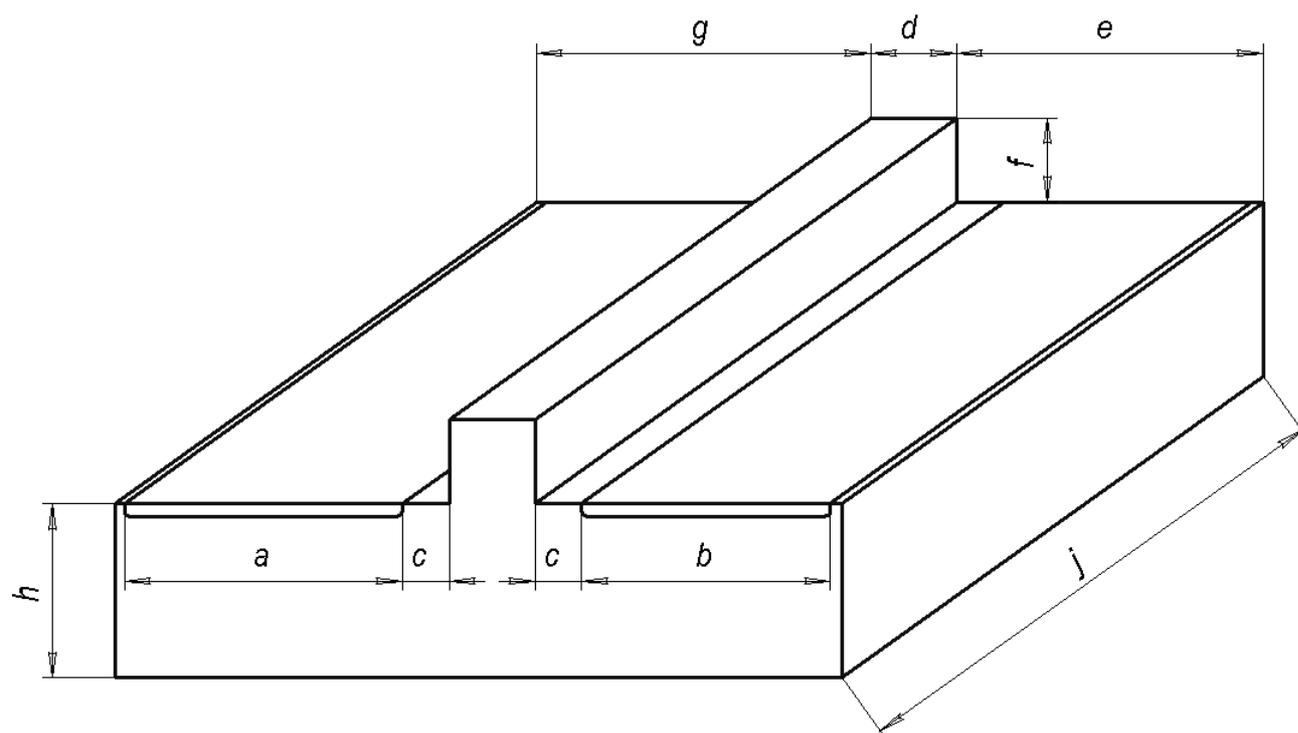
№	$D1$, мм	$D2$, мм	h , мм	α , град
1	53	10	5	45
2	55	11	6	60
3	57	11	7	46
4	59	12	8	60
5	61	13	5	45
6	65	12	6	60
7	55	10	5	45
8	60	11	8	60
9	65	10	5	45
10	50	11	6	60
11	55	12	8	45

Вариант 3.



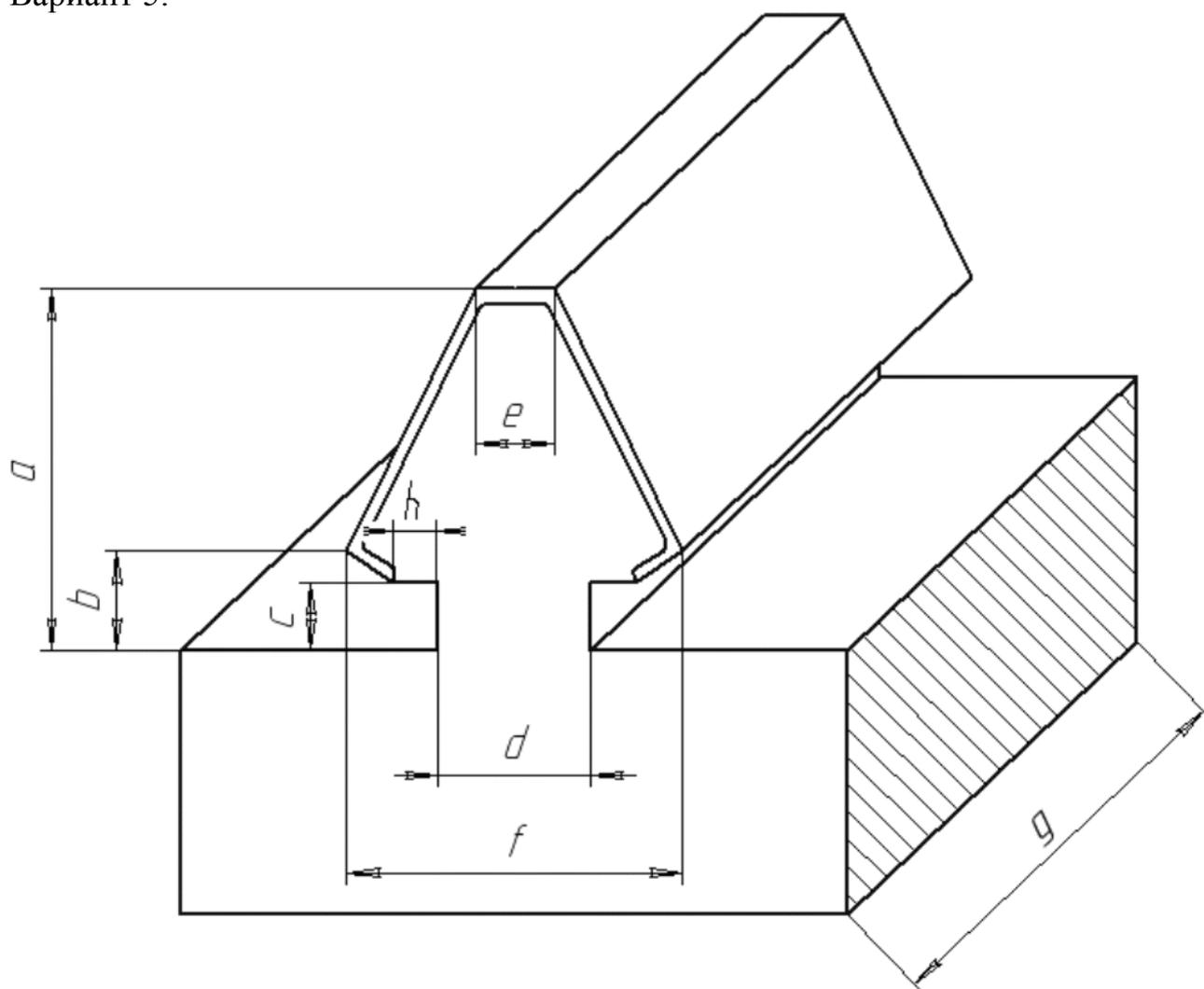
№	a , мм	b , мм	c , мм	d , мм	e , мм	$D1$, мм	$D2$, мм
1	5	35	5	40	90	50	70
2	6	30	5	45	90	60	80
3	7	30	5	50	105	55	90
4	5	40	10	55	115	65	95
5	6	40	10	30	90	70	100
6	7	40	10	60	130	75	120
7	5	50	10	45	125	80	140
8	6	55	10	50	130	75	110
9	7	50	8	55	130	70	95
10	5	40	8	40	105	65	90
11	6	40	8	35	105	60	90

Вариант 4.



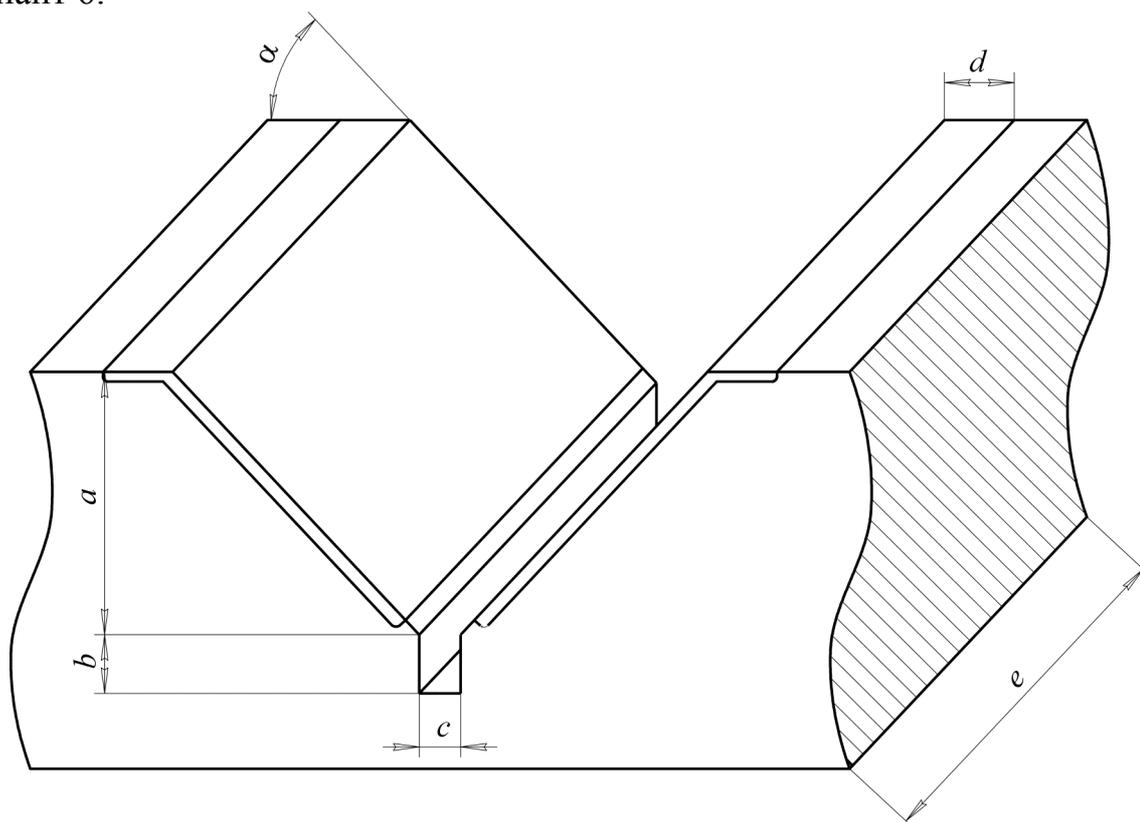
№	a , мм	b , мм	c , мм	d , мм	e , мм	f , мм	g , мм	h , мм	j , мм
1	90	35	5	5	50	8	150	20	40
2	90	30	5	6	55	8	125	25	40
3	105	30	5	7	55	8	140	30	40
4	115	40	4	5	60	10	160	30	30
5	90	40	4	6	62	10	140	35	30
6	130	40	4	7	64	10	175	35	30
7	125	50	4	5	65	10	185	30	45
8	130	55	4	6	70	8	200	30	45
9	130	50	8	7	75	8	185	35	40
10	105	40	8	5	65	8	150	20	40
11	105	40	8	6	60	8	155	25	40

Вариант 5.



№	a , MM	b , MM	c , MM	d , MM	e , MM	f , MM	g , MM	h , MM
1	90	35	15	50	5	80	150	10
2	90	30	25	60	5	85	125	7
3	105	30	15	70	5	95	140	7
4	115	40	24	50	6	120	160	15
5	90	40	14	60	6	85	140	7
6	130	40	24	70	6	140	175	20
7	125	50	14	50	6	130	185	30
8	130	55	24	60	7	125	200	25
9	130	50	18	70	7	125	185	20
10	115	25	15	50	6	100	150	17
11	105	40	18	60	6	110	155	20

Вариант 6.



№	a , мм	b , мм	c , мм	d , мм	e , мм	α , град
1	80	5	5	5	235	30
2	85	4	10	6	230	45
3	105	4	8	7	230	60
4	110	6	8	5	190	35
5	90	8	6	6	190	45
6	130	10	10	7	180	60
7	125	12	5	5	250	30
8	130	7	10	6	255	45
9	125	7	8	7	250	60
10	115	6	8	5	260	30
11	105	6	8	6	240	45

Удельные параметры нагреваемого металла

1. Удельное электрическое сопротивление (рис. П.2.1)

$$\rho_{15} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{800} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

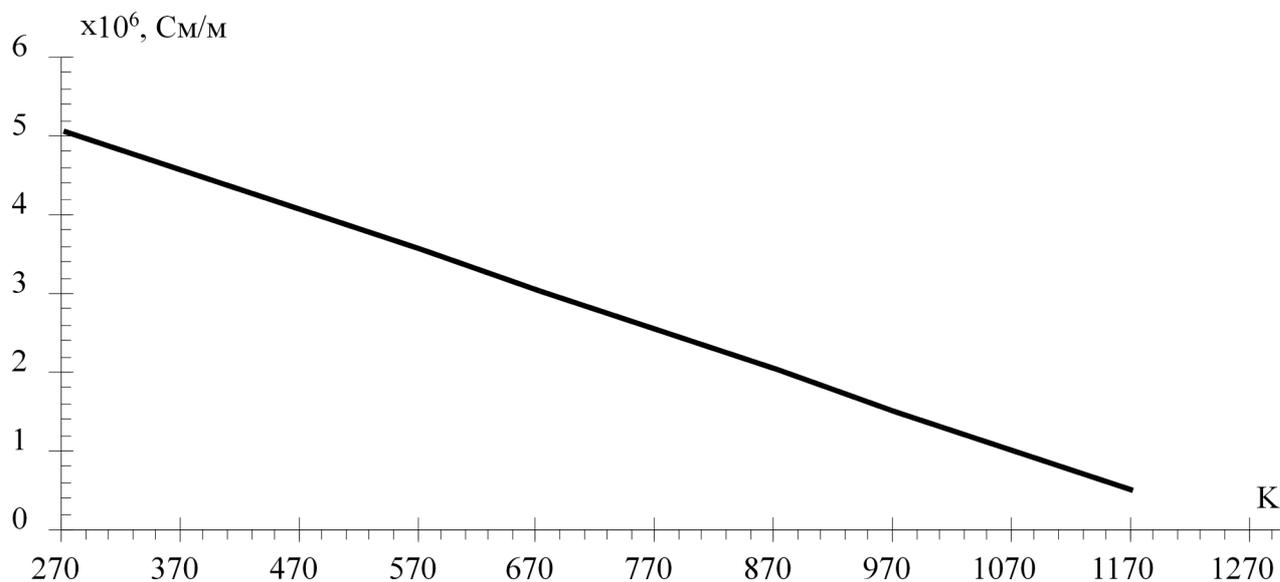


Рис. П.2.1. Зависимость удельной проводимости от температуры

2. Удельная теплопроводность (рис. П.2.2)

$$\lambda_{50} = 51.5 \text{ Вт/}(м\cdot\text{К}), \lambda_{900} = 33.5 \text{ Вт/}(м\cdot\text{К}).$$

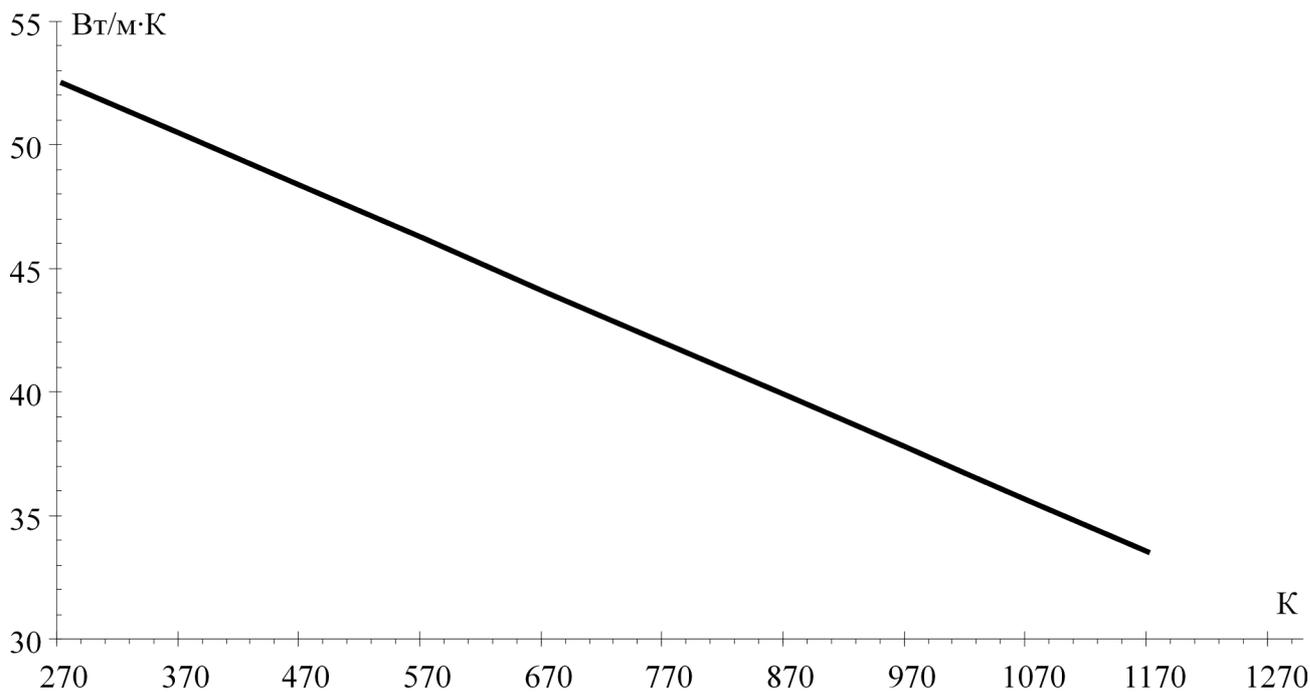


Рис. П.2.2. Зависимость удельной теплопроводности от температуры

3. Удельная теплоемкость (рис. П.2.3)

$$c_{50} = 468 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), c_{900} = 640 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

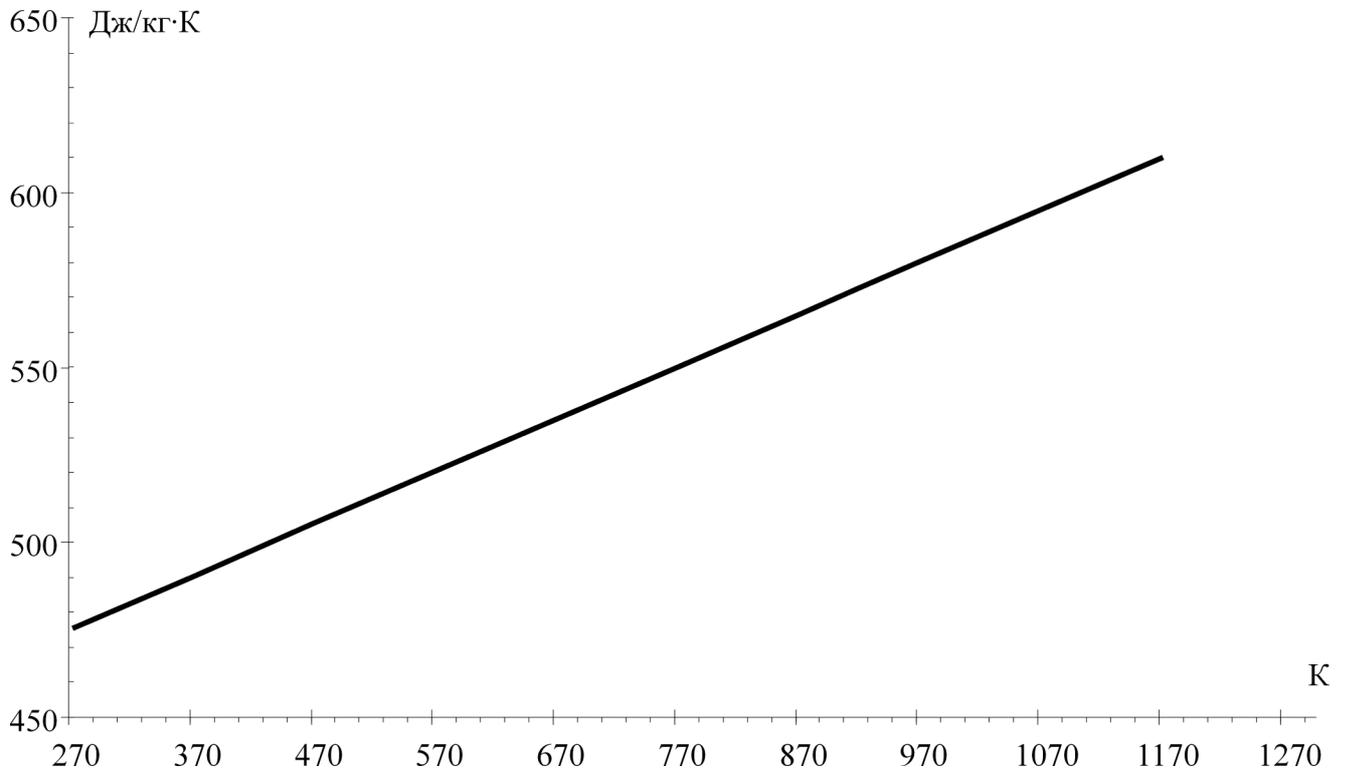


Рис. П.2.3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры

4. Плотность $\gamma = 7900 \text{ кг}/\text{м}^3$.

5. Усредненная кривая намагничивания (рис. П.2.4)

H, A/м	B, Тл	μ
0.4	1.4	299
0.8	1.635	164
1.59	1.785	89.2
2.39	1.873	62.3
3.99	1.985	39.7
7.97	2.099	21.0
15.94	2.228	11.1
23.91	2.338	7.8
31.88	2.441	6.1
35.87	2.491	5.5
39.85	2.540	5.1
47.70	2.640	4.4
55.70	2.740	3.9

Считаем, что при больших значениях напряженности сталь насыщается и относительная магнитная проницаемость не превышает значения 3.5 при любых значениях напряженности.

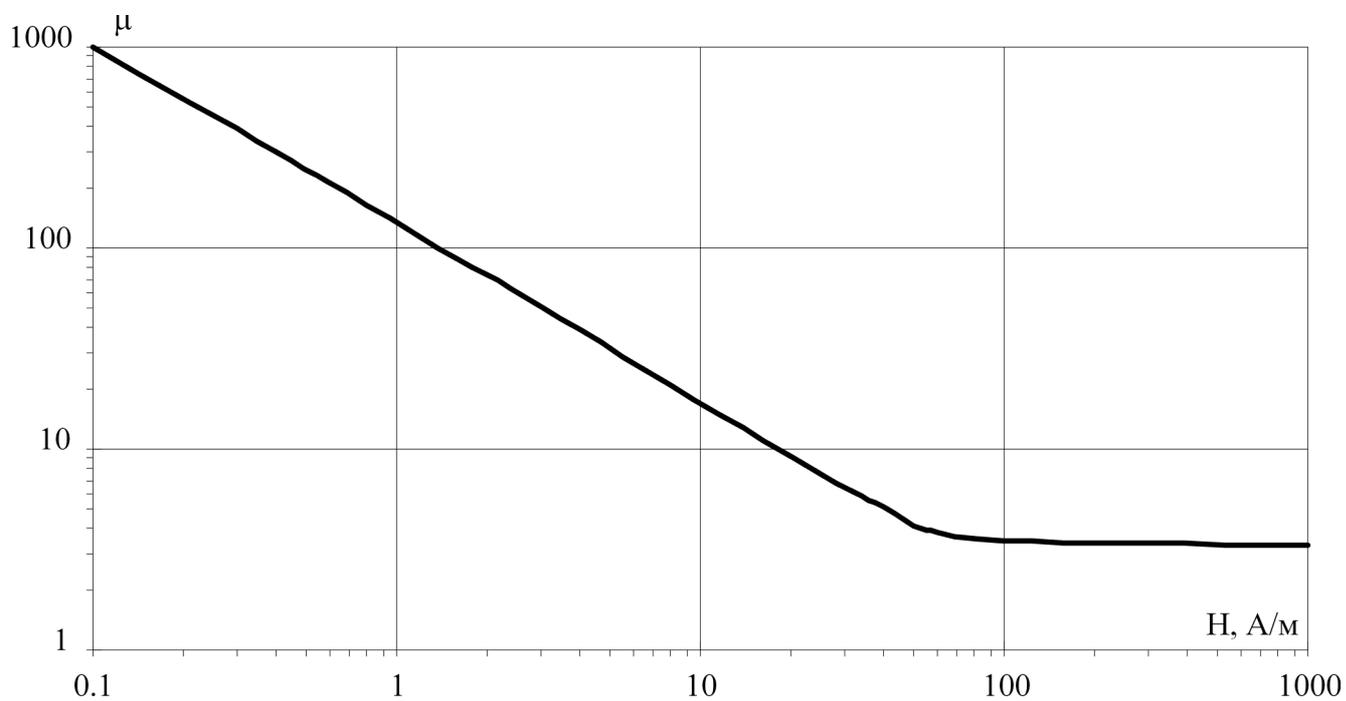


Рис. П.2.4. Зависимость относительной магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля

Пример выполнения расчетов

1. Начинаем выполнение работы с составления файла модели (*.mod) – он будет общим для всех файлов задач на каждом шаге расчета. Геометрическая модель для приведенного примера показана на рис. П.3.1.

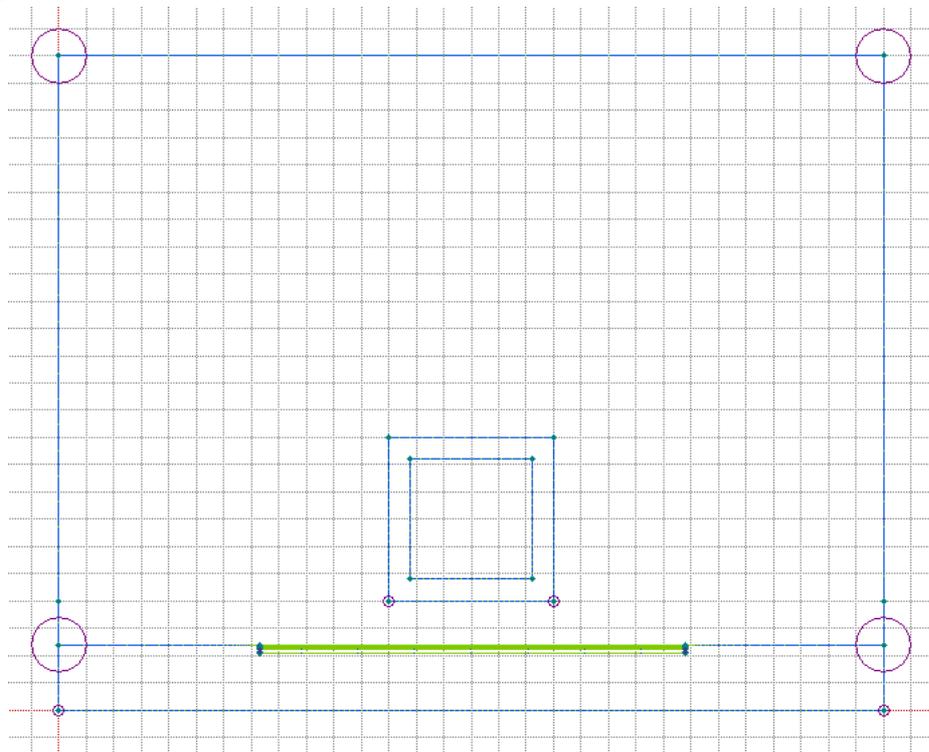


Рис. П.3.1

В зоне нагрева в соответствии с рекомендациями, приведенными выше, выделяем несколько слоев, в которых в процессе расчета будем менять удельные тепловые и электрические свойства.

На рис. П.3.2 показана укрупненно структура слоев нагреваемого металла. Для того чтобы средние температуры слоев вычислялись как можно точнее, следует боковые границы слоев располагать ближе к проекции боковых стенок индуктора на поверхность нагреваемого металла (зоне нагрева). Величина δ (рис. П.3.2) должна быть не больше зазора между индуктором и заготовкой.

2. Создаем файлы задач для каждого шага расчета и сразу связываем их между собой. На каждом шаге расчета необходимо будет корректировать временные параметры расчета, а также время, данные для которого будут передаваться на следующий шаг расчета. В начале расчетов выставляем значения временных параметров, приведенные по умолчанию.

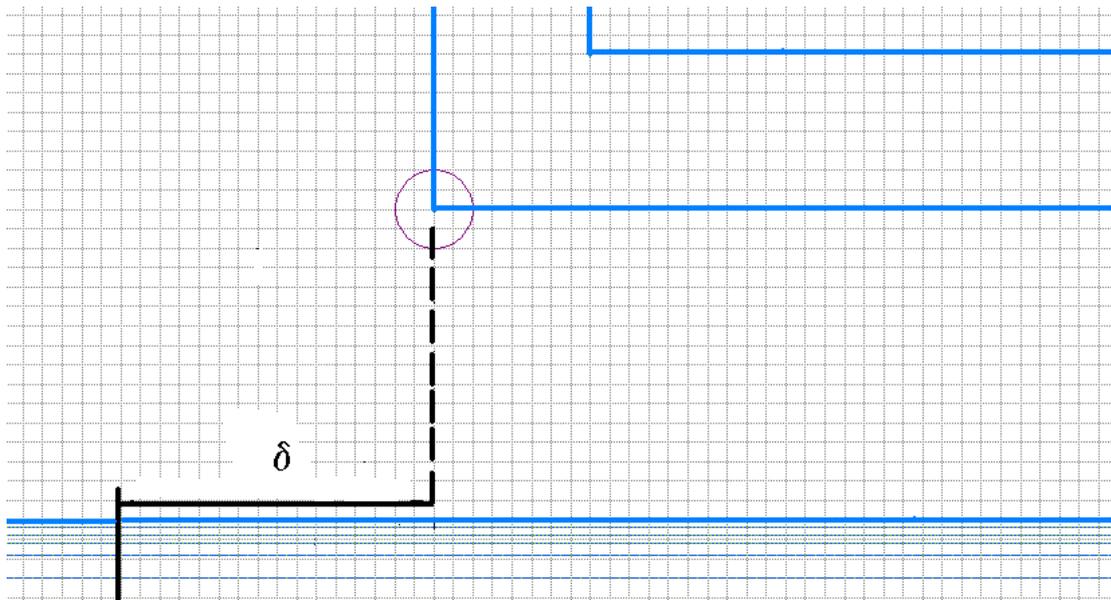


Рис. П.3.2

3. Для удобства работы с моделью при смене шага расчета создаем таблицу (табл. П.3.1 приведена для двух шагов расчета) в оболочке MS Excel, в которой будут вычисляться все удельные параметры для последующего шага.
4. Проводим пробный электромагнитный расчет и определяем средние напряженности поля в слоях металла (рис. П.3.3).

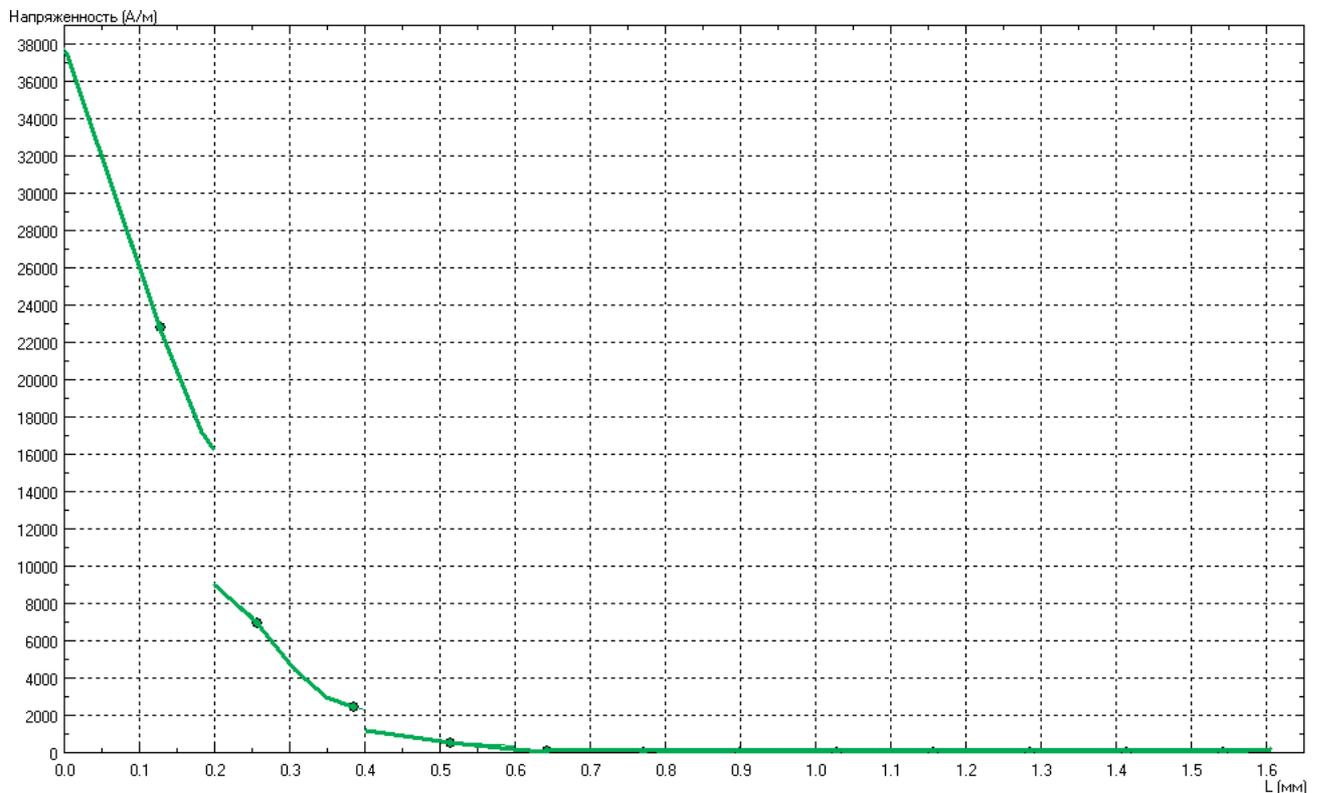


Рис. П.3.3

По полученным значениям напряженности электромагнитного поля в слоях металла определяем их магнитные проницаемости и производим повторный расчет. На первом шаге расчета удельные

электропроводности слоев принимаются равными друг другу (для температуры слоев 20°C). На последующих шагах значение электропроводности для каждого слоя будет вычислено отдельно.

5. Производим расчет электромагнитного поля с уточненными значениями магнитной проницаемости слоев нагреваемого металла (рис. П.3.4) и передаем полученные данные о мощности тепловыделения в слоях металла и индукторе в задачу нестационарной теплопередачи. Определяем здесь же среднюю мощность тепловыделения в выделенных слоях металла и в индукторе.

Таблица П.3.1

Таблица свойств

Шаг 1 (0,6 с)

Слой	Температура, °К	Температура, °С	Проводимость, См/м	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
1	378	105	4541401	50.34	491.18
2	374	101	4561783	50.42	490.58
3	369	96	4587261	50.53	489.84
4	362	89	4622929	50.67	488.79
5	352	79	4673885	50.89	487.29
6	299	26	4943949	52.01	479.37

Шаг 2 (+2 с)

Слой	Температура, °К	Температура, °С	Проводимость, См/м	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
1	477	204	4036942	48.24	505.99
2	472	199	4062420	48.34	505.24
3	467	194	4087898	48.45	504.49
4	460	187	4123566	48.60	503.45
5	448	175	4184713	48.85	501.65
6	322	49	4826751	51.52	482.81

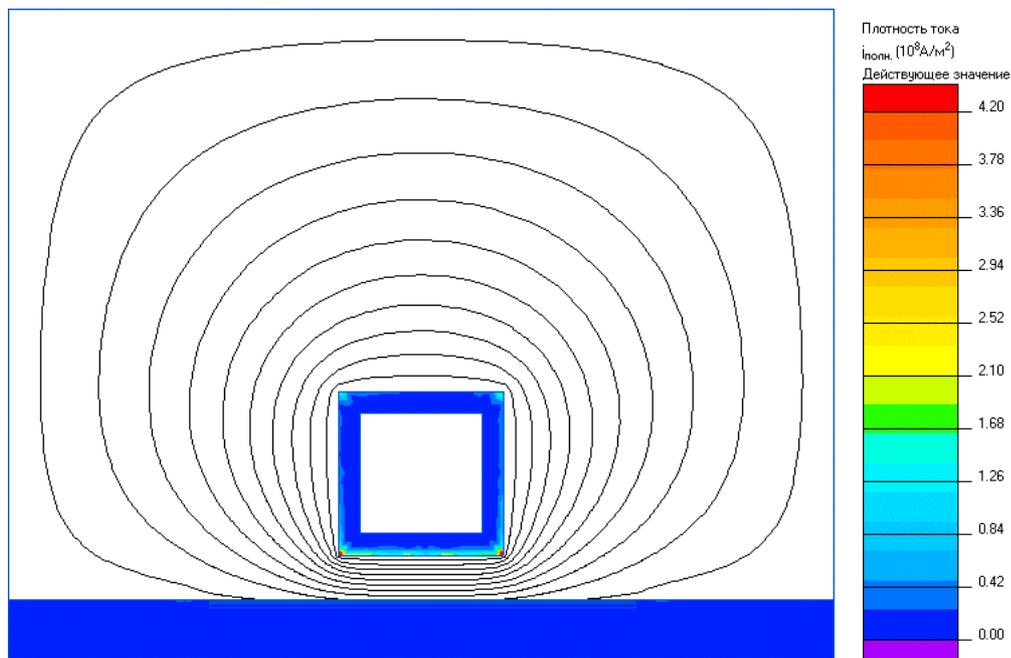


Рис. П.3.4

6. Производим расчет нестационарной теплопередачи на первом шаге. Для корректного выполнения расчета необходимо получить картину распределения начальных температур в моделируемой области. Для этого создаем и связываем с задачей нестационарной теплопередачи задачу вычисления поля температур (тип данных – температурное поле). До этого мы предварительно организовали связь с задачей магнитного поля переменных токов, в которой производим вычисление мощности тепловыделения в слоях металла (рис. П.3.5).

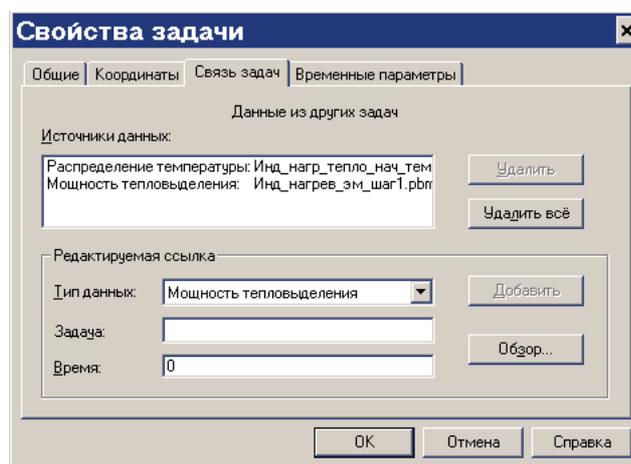


Рис. П.3.5

Результаты расчета приведены на рис. П.3.6, П.3.7.

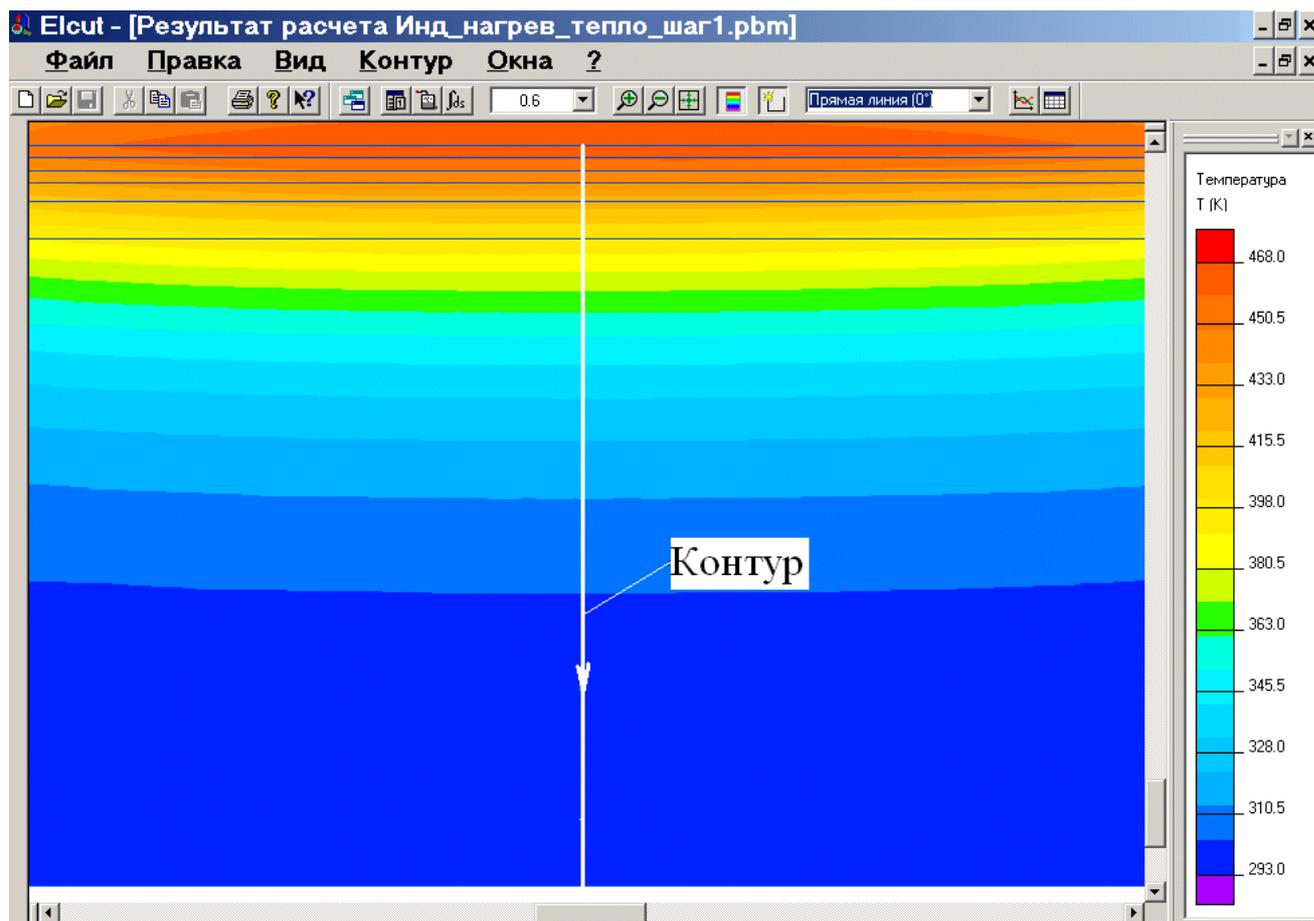


Рис. П.3.6

Для определения температуры поверхности заготовки проводим линию контура от поверхности вглубь металла и перелистываем моменты времени, для которых были сохранены результаты расчетов (временные параметры расчета выставляются в окне «Свойства задачи», закладка - «Временные параметры»).

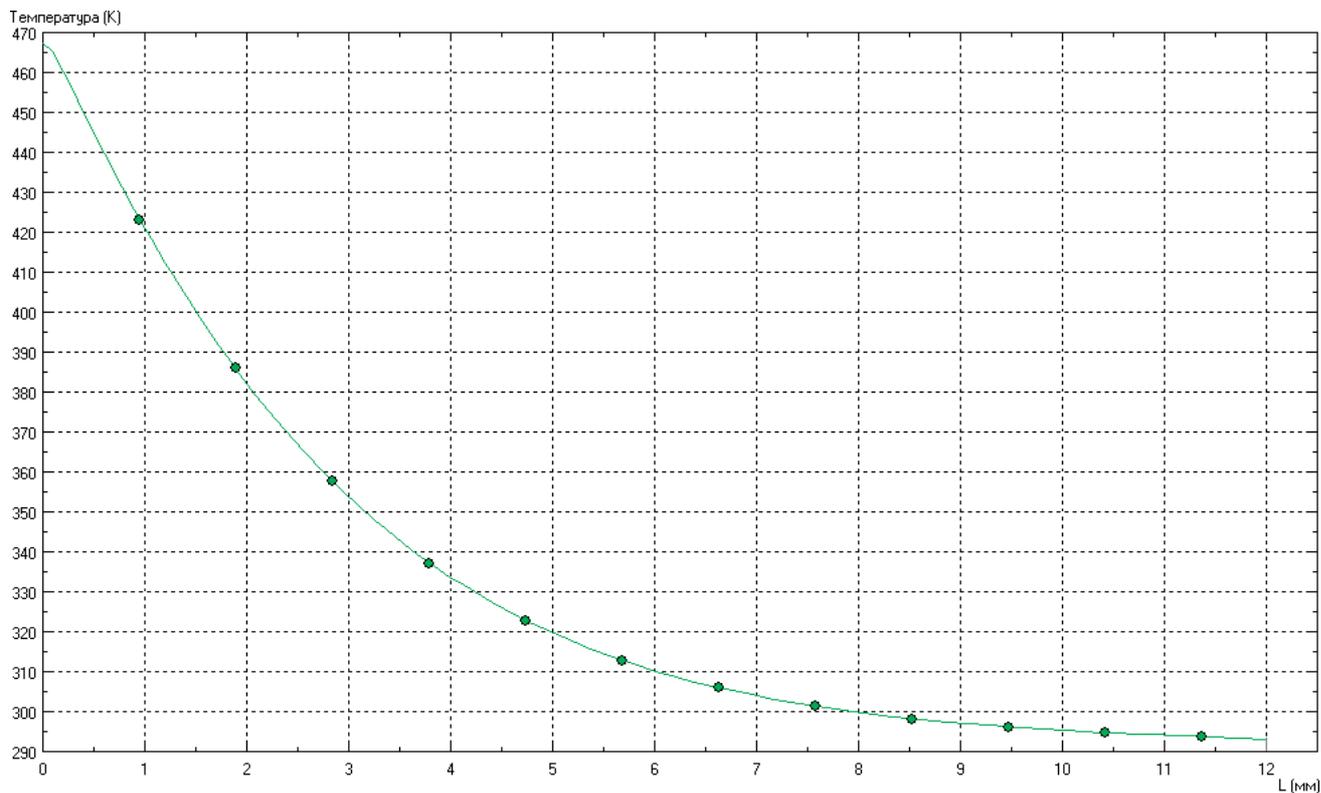


Рис. П.3.7

После определения времени первого шага определяем средние температуры слоев по объему в конце шага нагрева и передаем эти данные в табл. П.3.1.

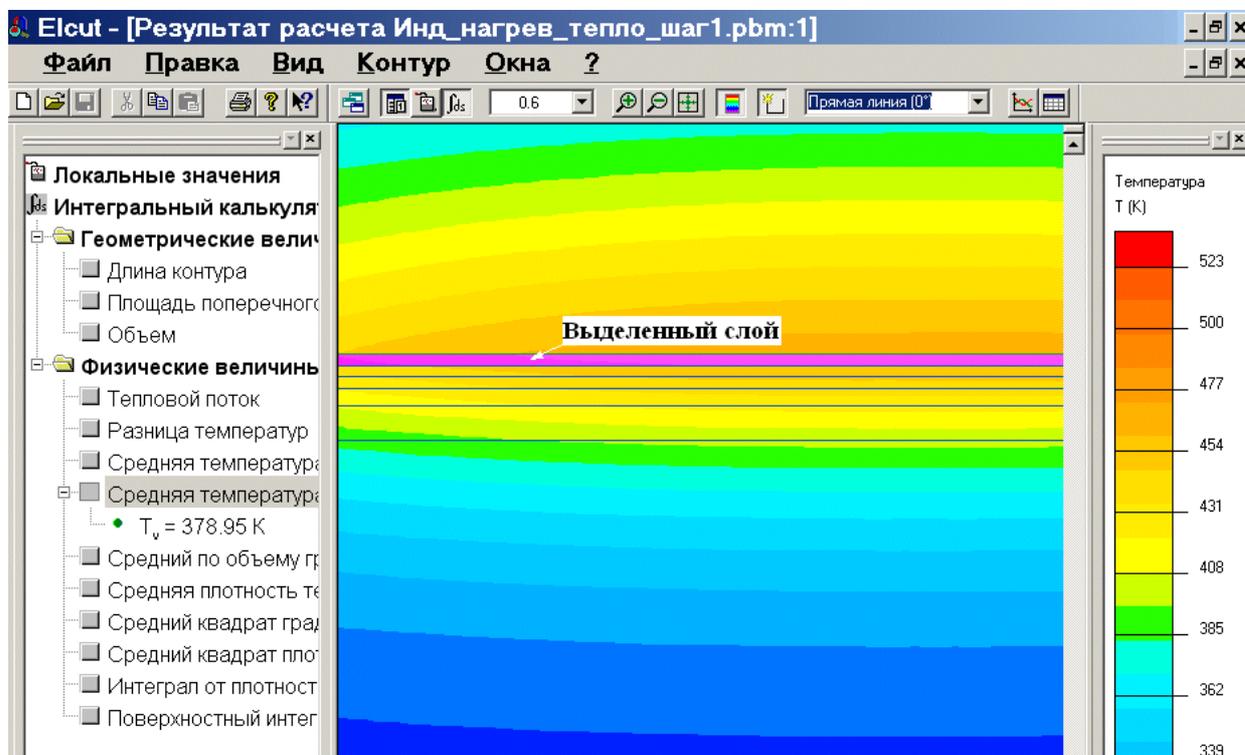


Рис. П.3.8

7. Вносим изменения в электромагнитную модель на шаге 2 в соответствии с температурами, вычисленными на шаге 1, и производим расчет электромагнитного поля на шаге 2.

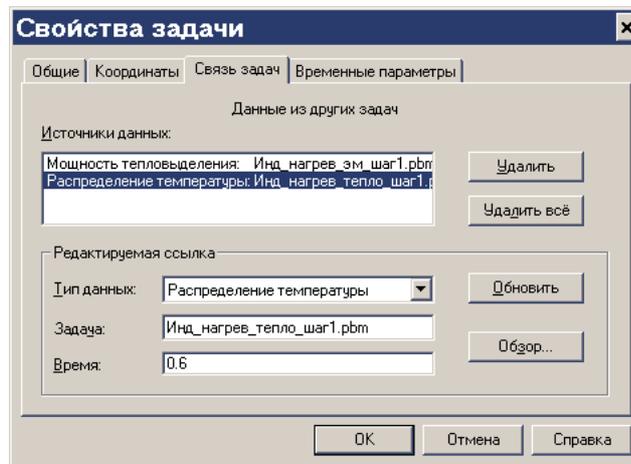


Рис. П.3.9

8. Задача нестационарной теплопередачи на втором шаге должна получить в качестве исходных данных поле температур к концу первого шага расчета. Для этого связываем обе задачи с указанием времени, для которого необходимо будет взять поле температур, и которое было определено как конечное на первом шаге расчета (рис. П.3.9).
9. Далее повторяется последовательность действий, приведенных в п. 5-7 до тех пор, пока температура на поверхности нагреваемого изделия не достигнет конечной величины.
10. Оформление отчета.

Оглавление

Задание на проектирование	3
1. Технологические требования	3
2. Технические требования	3
3. Рекомендации по выполнению расчетов.....	3
4. Порядок расчетов	6
5. Требования к оформлению отчета	7
Библиографический список.....	9
Варианты заданий	10
Удельные параметры нагреваемого металла.....	17
Пример выполнения расчетов.....	20