

Сборник задач

по курсу

Методы расчета электрических и магнитных полей

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Расчет поля постоянного магнита
2. Вытеснение переменного тока в шине прямоугольного сечения
3. Плунжерный электромагнит
4. Симметричная двухпроводная линия
5. Температурное поле в зубцовой зоне электрической машины
6. Цилиндр с теплопроводностью, зависящей от температуры
7. Двухпроводная линия передачи
8. Линейный асинхронный двигатель
9. Распределение температуры в проводнике с током
10. Насос для перекачки жидкого металла
11. Двухпроводная линия передачи
12. Электрический двигатель
13. Индукционная тигельная печь
14. Расчет поля подковообразного постоянного магнита
15. Расчет индуктивности дросселя броневой конструкции
16. Проводник в ферромагнитном пазу
17. Нестационарное температурное поле в зубцовой зоне электрической машины
18. Расчет индуктивности кабеля
19. Температурный отклик на быстрое изменение температуры внешней среды
20. Изменение распределения температуры в пластине из ортотропного материала
21. Расчет напряженного состояния тонкой перфорированной пластины
22. Соленоидальный электромагнит установки термоядерного синтеза Токамак
23. Полый толстостенный цилиндр, подвергнутый нагреву и давлению

1. Расчет поля постоянного магнита

Задание: Рассчитать картину поля постоянного магнита, определить максимальное значение магнитной индукции. Расчет выполнить для двух вариантов:

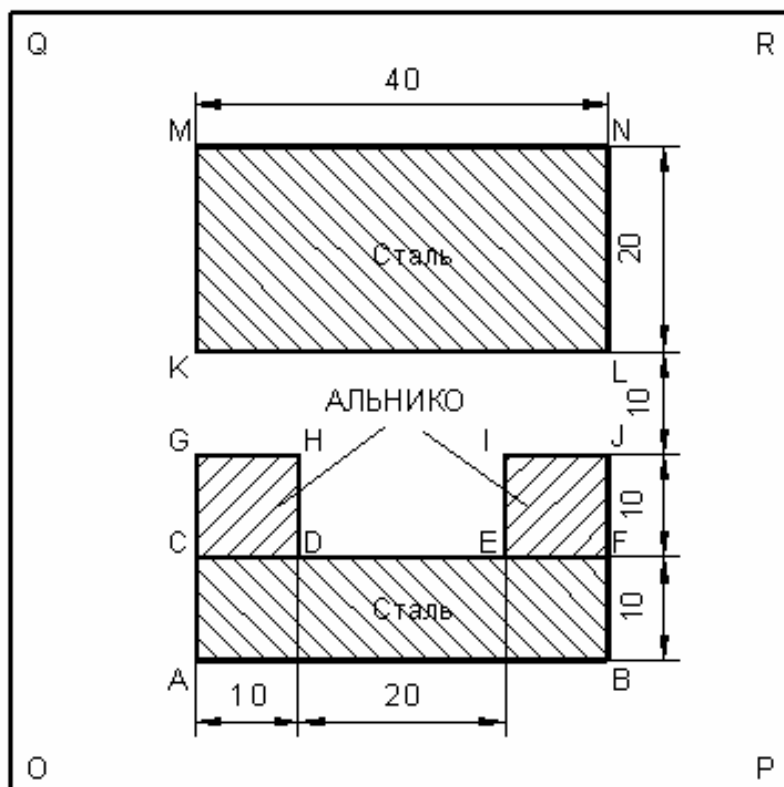
- без учета нелинейных свойств материалов,
- с учетом нелинейных свойств материалов.

Объект: Постоянный магнит со стальным сердечником и якорем.

Тип задачи: Магнитостатика.

Класс модели: Плоская.

Геометрия модели (все размеры указаны в сантиметрах):



Рекомендуемый размер расчетной области QRPO: 100x100см.

Рекомендуемый шаг сетки привязки: 10 см.

Рекомендуемый шаг дискретизации:

в узлах Q,R,P,O – 12 мм,

в узлах G,H,I,J – 5 мм.

Исходные данные:

Постоянные магниты изготовлены из сплава АЛНИКО, коэрцитивная сила составляет 147218 А/м. Магниты намагничены в вертикальном направлении противоположно друг другу (направление коэрцитивной силы: для левого магнита 90° , для правого магнита -90°).

Кривая размагничивания для 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

Характеристика 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	1.6

Относительная магнитная проницаемость воздуха – $\mu = 1$.

Граничные условия: магнитный потенциал на границах расчетной области $A = 0$.

При решении задачи в линейной постановке принять значения относительной магнитной проницаемости материалов следующими: сплав АЛНИКО - $\mu = 1$, сталь - $\mu = 100$.

2. Вытеснение переменного тока в шине прямоугольного сечения, уложенной в паз электрической машины.

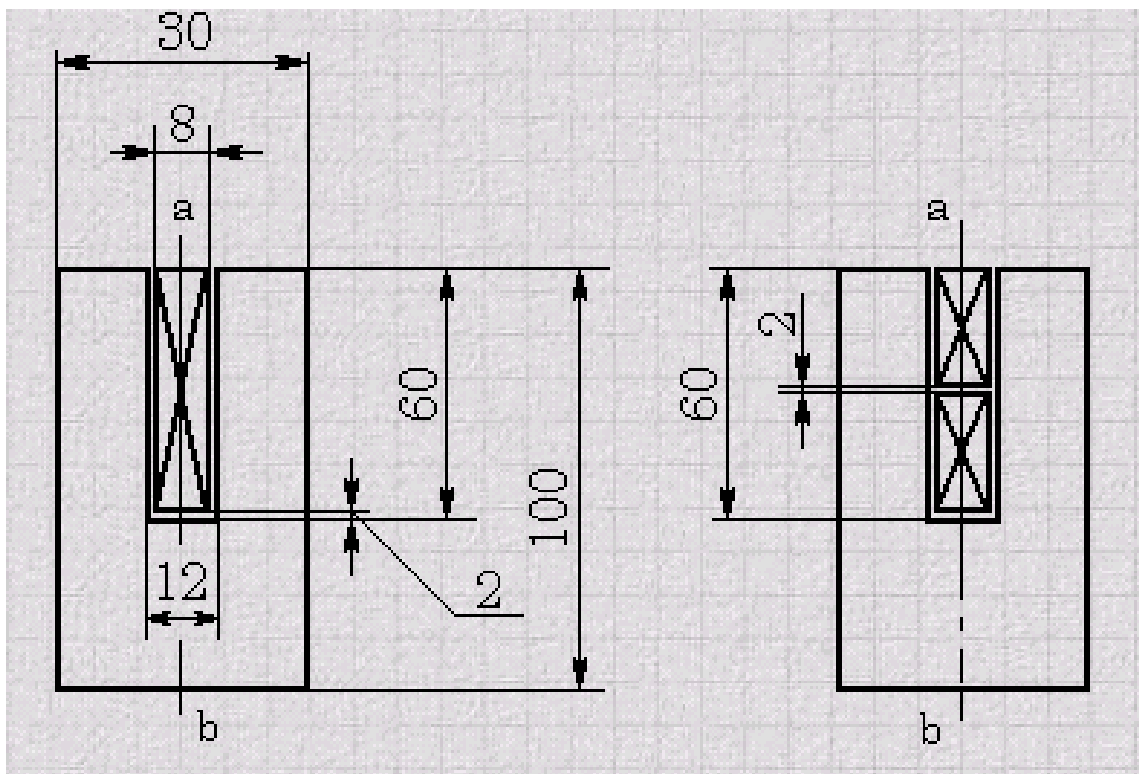
Задание: Рассчитать картину распределения тока в пазу электрической машины (для одного и двух проводников в пазу). Построить график распределения плотности тока по сечению проводника (в качестве начала системы координат принять нижнюю границу проводника).

Тип задачи: Гармоническое электромагнитное поле. Среды линейные.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия (все размеры в миллиметрах):

При расчете удобно выполнить моделирование только одной половины задачи (например, области, находящейся справа от оси симметрии - ab).



Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость стали $\mu = 100$.

Относительная магнитная проницаемость медной шины и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность меди $\sigma = 57000000 \text{ См/м}$.

Сталь паза шихтованная, поэтому её электропроводность вдоль проводника равна $\sigma = 0 \text{ См/м}$. Суммарный ток в проводнике $I = 600 \text{ А}$. Частота тока $f = 50 \text{ Гц}$.

При наличии в пазу двух шин ток в них течет одного направления (в каждой шине по 300 А).

Граничные условия:

На оси вертикальной симметрии (линия ab) имеем $H_t = 0$. На остальных весьма удаленных границах поле сильно ослабляется, поэтому принимаем условие $A = 0$.

3. Плунжерный электромагнит

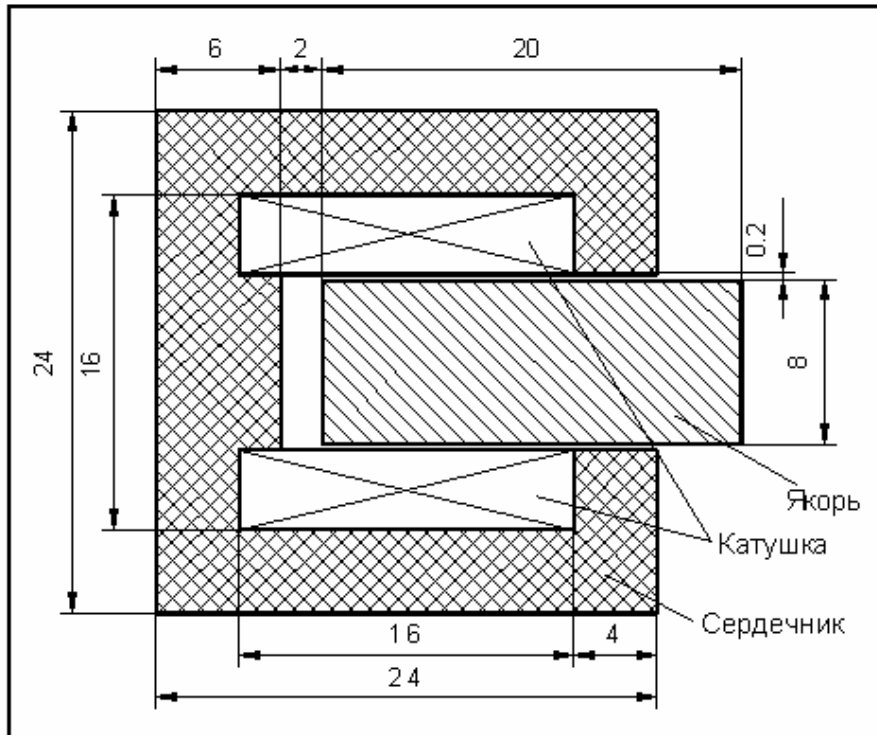
Задание: Рассчитать магнитное поле в устройстве и тяговое усилие, приложенное к якорю.

Объект: Соленоидальный плунжерный электромагнит состоящий из обмотки, окруженной ферромагнитным сердечником и якоря в виде плунжера.

Тип задачи: Магнитостатика.

Класс задачи: Осесимметричная

Геометрия (все размеры заданы в сантиметрах):



При расчете удобно выполнить моделирование только одной половины задачи (например, области, находящейся выше оси симметрии). Рекомендуемый размер расчетной области - 40x16 см. Слой воздуха между правым торцом якоря и границей расчетной области – 1 см.

Рекомендуемый шаг дискретизации:

в узлах на границе области – 3 см.

в узлах на границе якоря и воздушного зазора – 1 см.

Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость воздуха и катушки $\mu = 1$;

Плотность тока в катушке $J = 1100\ 000\ \text{А/м}^2$;

Характеристика намагничивания для материала сердечника и якоря:

H, А/м	460	640	720	890	1280	1900	3400	6000
B, Тл	0.80	0.95	1.00	1.10	1.25	1.40	1.55	1.65

Примечание:

Магнитная система соленоида полностью замкнута, поэтому внешнюю границу модели можно поместить относительно близко к сердечнику

соленоида. Более протяженный слой воздуха включается в модель со стороны якоря, поскольку в этой зоне нельзя пренебречь выпучиванием поля.

Плотность сетки можно выбрать по умолчанию, однако, для улучшения распределения сетки в модель рекомендуется включить три дополнительных вершины. Первую желательно поместить на внутреннюю поверхность катушки вблизи угла якоря, а две другие - напротив углов сердечника на обеих сторонах якоря.

Замкнутый контур для вычисления силы должен окружать якорь. Его необходимо расположить в середине воздушного зазора между якорем и сердечником. Определяя контур интегрирования, рекомендуется использовать сильное увеличение масштаба, чтобы избежать прилипания линий контура к сторонам модели.

4. Симметричная двухпроводная линия

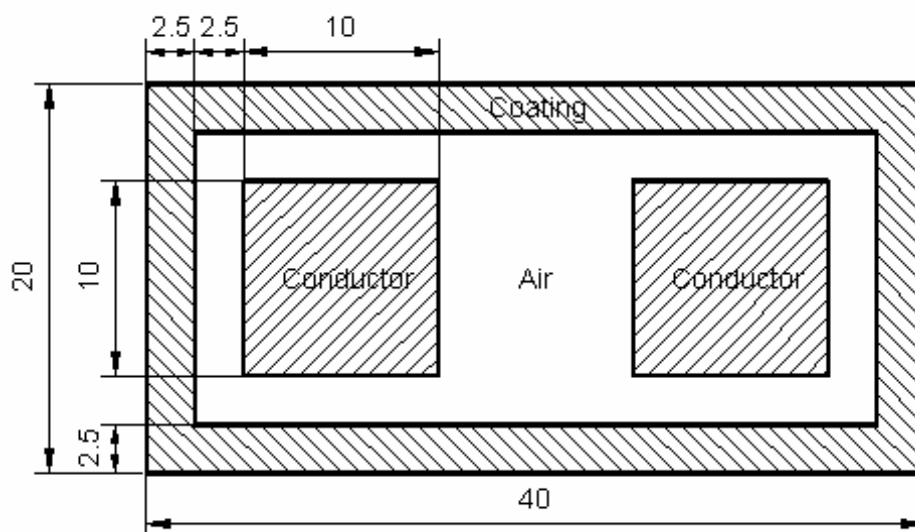
Задание: Найти распределение токов внутри проводников, импеданс линии и потери в экране.

Объект: Два проводника квадратного сечения с одинаковыми токами, противоположными по фазе помещены внутри прямоугольного ферромагнитного экрана.

Тип задачи: Магнитное поле переменных токов.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия (все размеры заданы в миллиметрах):



Исходные данные:

Магнитная проницаемость воздуха $\mu = 1$;

Магнитная проницаемость меди $\mu = 1$;

Электропроводность меди $\sigma = 56\,000\,000$ См/м;

Магнитная проницаемость экрана $\mu = 100$;

Электропроводность экрана $s = 1\,000\,000$ См/м;

Ток в проводниках $I = 1$ А;

Частота $f = 100$ Гц.

Примечание:

Предполагая, что магнитный поток целиком содержится в экране, мы можем задать граничное условие Дирихле на его внешней поверхности $A = 0$.

Комплексное сопротивление (импеданс) линии на единицу длины может быть вычислен по формуле

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I},$$

где U_1 и U_2 - падения напряжения на единицу длины в каждом из проводников. Вследствие симметрии эти напряжения равны по величине и противоположны по знаку. Чтобы узнать падение напряжения, включите режим **Локальные Значения** (меню **Вид**) окна анализа результатов и щелкните мышью в любую точку проводника.

Чтобы определить омические потери в экране:

1. В окне анализа результатов войдите в режим **Контур/Добавить** и укажите мышью экран для создания контура.

2. Выберите команду **Вид/Интегральные значения**, выберите **Мощность тепловыделения** в списке интегральных величин и нажмите кнопку **Вычислить**.

5. Температурное поле в зубцовой зоне электрической машины

Задание: Рассчитать температурное поле в зубцовой зоне электрической машины.

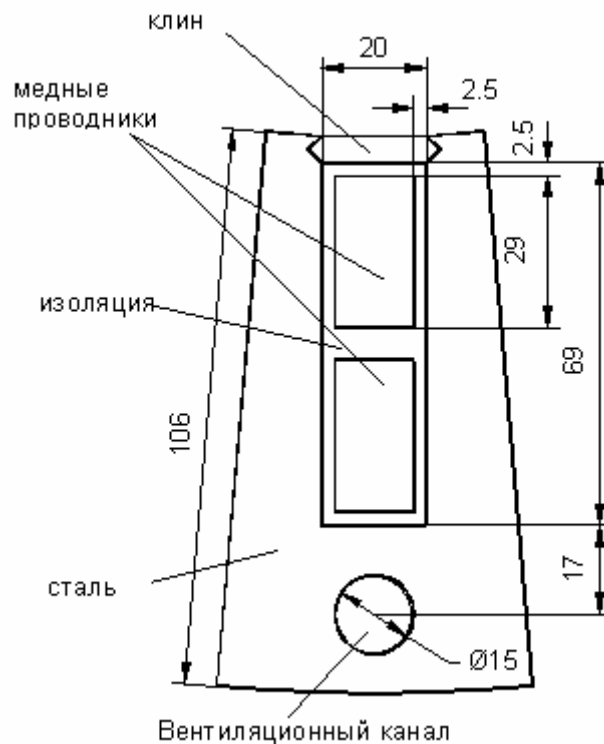
Объект: Зубцовая зона статора синхронного двигателя.

Тип задачи: Температурное поле.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия (все размеры заданы в миллиметрах):

Наружный диаметр статора 690 мм.



Область расчета представляет собой сегмент поперечного сечения статора двигателя в объеме одного зубцового деления (сегмент 10°). Два стержневых проводника, уложенные в прямоугольном пазу, нагреваются омическими потерями. Охлаждение осуществляется потоком воздуха через осевой вентиляционный канал и по наружной и внутренней поверхностям статора.

Исходные данные:

Удельная мощность тепловыделения в меди: $360\,000\text{ Вт/м}^3$;

Теплопроводность стали: $25\text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;

Теплопроводность меди: $380\text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;

Теплопроводность изоляции: $0.15\text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;

Теплопроводность клина: $0.25\text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;

Граничные условия (конвекция):

	Коэффициент Теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$	Температура омывающего воздуха, C^0
Внутренняя поверхность статора	250	40
Внешняя поверхность статора	70	20
Вентиляционный канал	150	40

6. Цилиндр с теплопроводностью, зависящей от температуры

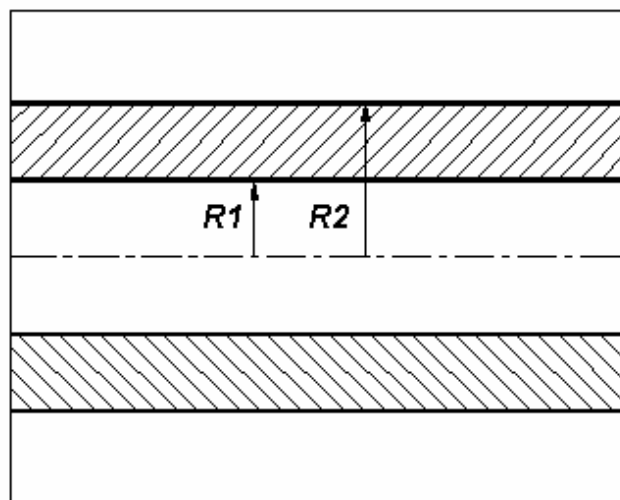
Задание: Найти распределение температуры в цилиндре.

Объект: Весьма длинный цилиндр (бесконечной длины) помещен в следующие условия: на внутренней поверхности поддерживается температура T_i и на внешней поверхности температура T_0 . Теплопроводность цилиндра зависит от температуры по линейному закону: $\lambda(T) = C_0 + C_1 \cdot T$.

Тип задачи: Температурное поле.

Класс задачи: Осесимметричная.

Геометрия (все размеры заданы в миллиметрах):



Исходные данные:

$$R1 = 5 \text{ мм},$$

$$R2 = 10 \text{ мм};$$

$$T_i = 100 \text{ C}^0,$$

$$T_0 = 10 \text{ C}^0;$$

$$C_0 = 50 \text{ Дж/К}\cdot\text{м},$$

$$C_1 = 0.5 \text{ Дж/К}^2\cdot\text{м}.$$

Примечание:

Осевую длину модели установить произвольно (например, равной 5 мм).

7. Двухпроводная линия передачи

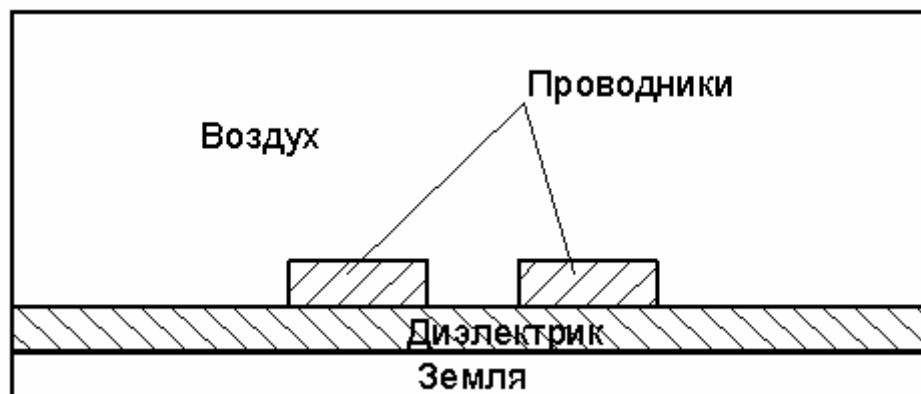
Задание: Рассчитать электростатическое поле. Определить собственную и взаимную емкость проводников.

Объект: Двухпроводная линия передачи. Область задачи ограничена Землей снизу и бесконечна в трех других направлениях.

Тип задачи: Задача электростатики.

Класс задачи: Плоско-параллельная.

Геометрия:



Исходные данные:

Размер проводника: 10x30 мм.

Расстояние между проводниками: 20 мм.

Толщина диэлектрика: 10 мм.

Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_0 = 1$;

Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon = 2$.

Примечание:

Для решения теоретически бесконечной задачи удобно определить область расчета как прямоугольник, достаточно большой (например, 24x40 мм), для того чтобы исключить влияние краевых эффектов.

Для вычисления матрицы емкостей необходимо установить потенциалы $U = 1$ В у одного проводника и $U = 0$ у другого, тогда выражения для емкостей примут вид:

$$\text{Собственная емкость: } C_{11} = C_{22} = \frac{Q_1}{U_1},$$

Взаимная емкость: ; $C_{12} = C_{21} = \frac{Q_2}{U_1}$,

где заряды проводников Q_1 и Q_2 вычисляются как интегралы вдоль прямоугольных контуров, проведенных вокруг проводников 1 и 2 с отступом от их границ.

8. Линейный асинхронный двигатель

Задание:

1. Рассчитать картину электромагнитного поля. Построить графики распределения тока во вторичном элементе (в продольном и поперечном направлениях) и индукции в воздушном зазоре ЛАД. Определить тяговое усилие ЛАД в диапазоне частот от 1 до 100 Гц. Амплитуда тока в проводниках $I = 2608$ А. Фаза тока в каждом пазу определяется схемой обмотки.
2. Расчитать тепловые переходные процессы. Температура окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить изменение температуры ВЭ во времени в трех локальных точках проводящего покрытия ВЭ (в центре и на краях), а также среднего значения температуры ВЭ. Частота тока индуктора 50 Гц, Амплитуда тока в проводниках $I = 2608$ А.

Задание выполнить для следующих вариантов вторичного элемента:

- а). Биметаллический вторичный элемент. Материал покрытия – медь
- б). Вторичный элемент в виде беличьей клетки. Материал клетки – медь. Ширина паза – 10 мм, глубина паза – 10 мм, ширина зубца – 10 мм.
- в). Биметаллический вторичный элемент. Материал покрытия – алюминий.
- г). Вторичный элемент в виде беличьей клетки. Материал клетки – алюминий. Ширина паза – 10 мм, глубина паза – 10 мм, ширина зубца – 10 мм.
- д). Стальной массивный вторичный элемент.

Объект: Односторонний линейный асинхронный двигатель.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

Зубцовое деление: 32 мм.

Ширина паза: 20 мм.

Высота паза: 41 мм.

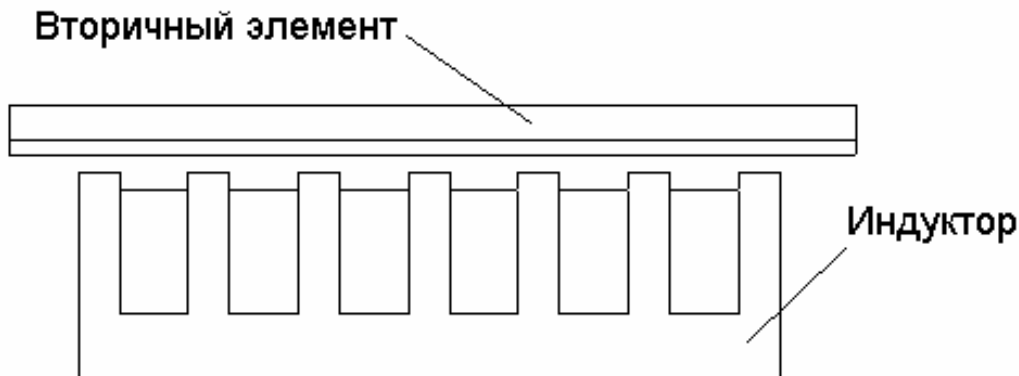
Высота проводника: 36 мм.

Высота ярма индуктора: 19 мм.

Воздушный зазор: 5 мм.

Толщина проводящего покрытия ВЭ: 5 мм.

Толщина сердечника ВЭ: 10 мм.
Длина вторичного элемента – 250 мм



Исходные данные:

Свойства материалов:

Относительная магнитная проницаемость:

- стали индуктора $\mu = 1000$;
- стали ВЭ $\mu = 10$;
- проводников индуктора, проводящего покрытия ВЭ и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность:

- медь $\sigma = 56\,000\,000$ См/м;
- алюминий $\sigma = 33\,000\,000$ См/м.

Теплопроводность:

- сталь $\lambda = 75$ Вт/К·м;
- медь $\lambda = 380$ Вт/К·м;
- алюминий $\lambda = 211$ Вт/К·м;
- воздух $\lambda = 0.024$ Вт/К·м.

Теплоемкость:

- сталь $C = 465$ Дж/кг·К;
- медь $C = 380$ Дж/кг·К;
- алюминий $C = 880$ Дж/кг·К;
- воздух $C = 1000$ Дж/кг·К.

Плотность:

- сталь $\rho = 7833$ кг/м³;
- медь $\rho = 8950$ кг/м³;

- алюминий $\rho = 2701 \text{ кг/м}^3$;
- воздух $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности ВЭ
 $\alpha = 70 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м}^2)$

9. Распределение температуры в проводнике с током

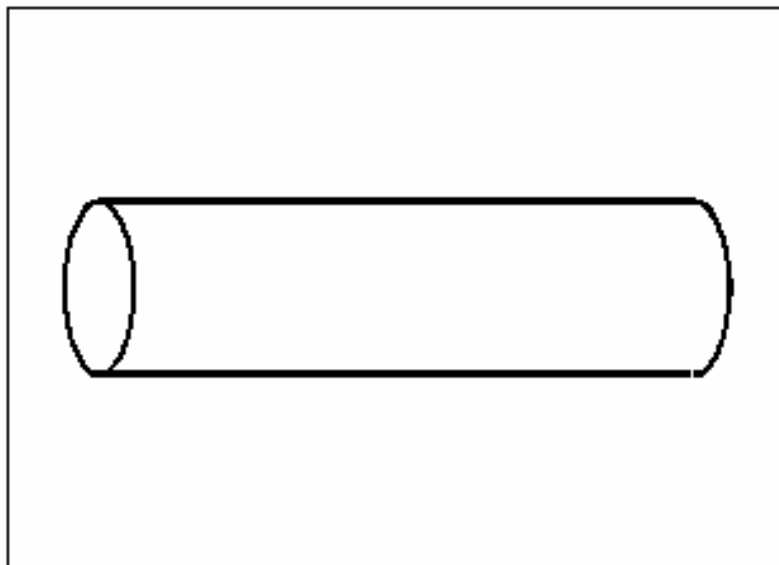
Задание: Рассчитать распределение температуры в длинном проводнике с током.

Объект: Отрезок проводника по которому протекает ток.

Тип задачи: Совмещенная электро-термическая задача.

Класс задачи: Осесимметричная.

Геометрия:



Исходные данные:

Диаметр провода $d = 10 \text{ мм}$;

Погонное электрическое сопротивление провода $R = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}$;

Ток в проводнике $I = 1000 \text{ А}$;

Теплопроводность материала проводника $\lambda = 20 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$;

Коэффициент теплоотдачи внешней поверхности проводника $\alpha = 800 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$;
Температура внешней среды $T_0 = 20 \text{ С}^0$.

Примечания:

В качестве модели удобно выбрать отрезок провода длиной $l = 10 \text{ мм}$.

Удельное сопротивление материала провода можно рассчитать по формуле

$$\rho = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot R}{4}$$

Для задачи протекания тока необходимо задать электрические потенциалы на двух боковых сечениях проводника (разность потенциалов рассчитывается по выражению $\Delta U = I \cdot R$) и условие нулевого тока через внешнюю поверхность.

Для задачи теплопроводности задаются условие нулевого теплового потока через боковые сечения и условие конвективного теплообмена через внешнюю поверхность.

10. Насос для перекачки жидкого металла

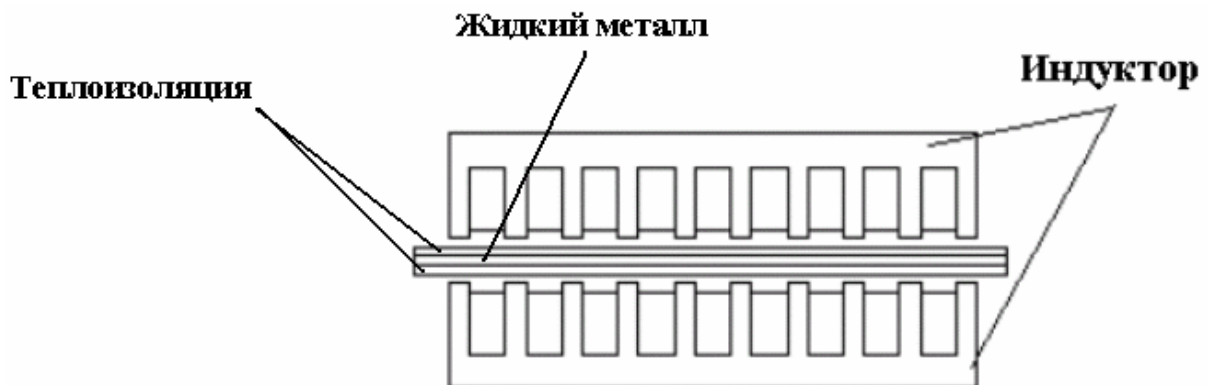
Задание: Рассчитать картину электромагнитного поля. Построить графики распределения тока в жидком металле и индукции в воздушном зазоре ЛАД. Определить зависимость усилия возникающего в жидком металле от частоты тока в обмотке индуктора в диапазоне от 0 до 100 Гц (10 точек).

Объект: Насос для перекачки жидкого металла

Тип задачи: Магнитное поле переменных токов.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:



Исходные данные:

Зубцовое деление: 32 мм.

Ширина паза: 20 мм.

Высота паза: 41 мм.

Высота проводника: 36 мм.

Высота ярма индуктора: 19 мм.

Воздушный зазор: 5 мм.

Толщина канала: 5 мм.

Толщина теплоизоляции канала: 5 мм.

Относительная магнитная проницаемость стали индуктора $\mu = 100$.

Относительная магнитная жидкого металла $\mu = 1$.

Относительная магнитная проницаемость проводников индуктора и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность жидкого металла ВЭ $\sigma = 33\,000\,000$ См/м.

Удельная электропроводность проводников обмотки $\sigma = 56\,000\,000$ См/м.

Электропроводность сердечников индуктора $\sigma = 0$ См/м.

Действующее значение тока в проводнике $I = 2608$ А. Частота тока $f = 50$ Гц.

Фаза тока в каждом пазу определяется схемой обмотки (А, -С, В, -А, С, -В, А, -С, В).

11. Двухпроводная линия передачи

Задание: Рассчитать картину электрического поля. Построить графики распределения потенциала в диэлектрике в поперечном и продольном направлениях.

Определить собственную и взаимную емкость проводников в зависимости от расстояния между проводниками (от 1 до 100 мм, 10-15 точек).

Объект: Двухпроводная линия передачи

Тип задачи: Электростатика

Класс задачи: Плоская.

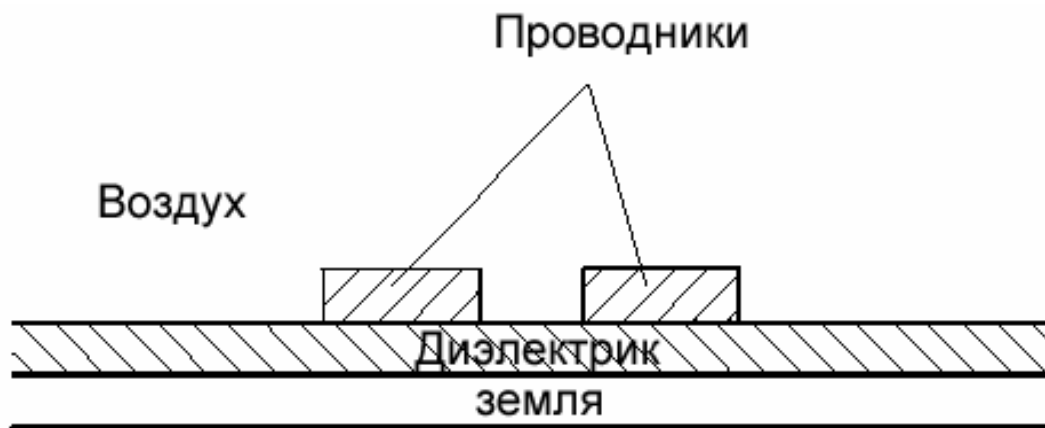
Геометрия:

Ширина проводника: 30 мм

Толщина проводника: 10 мм

Расстояние между проводникам: 20 мм

Толщина диэлектрика: 10 мм



Исходные данные:

Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon = 1$
 Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon = 2$
 Потенциал первого проводника: 1 В
 Потенциал второго проводника: 0 В

Собственная емкость вычисляется по выражению:

$$C_{11} = C_{22} = \frac{Q_1}{U_1},$$

Взаимная емкость вычисляется по выражению:

$$C_{12} = C_{21} = \frac{Q_2}{U_1},$$

где заряды проводников Q_1 и Q_2 вычисляются как интегралы вдоль прямоугольных контуров, проведенных вокруг проводников 1 и 2 с отступом от их границ.

12. Электрический двигатель

Задание: Рассчитать картину магнитного поля.

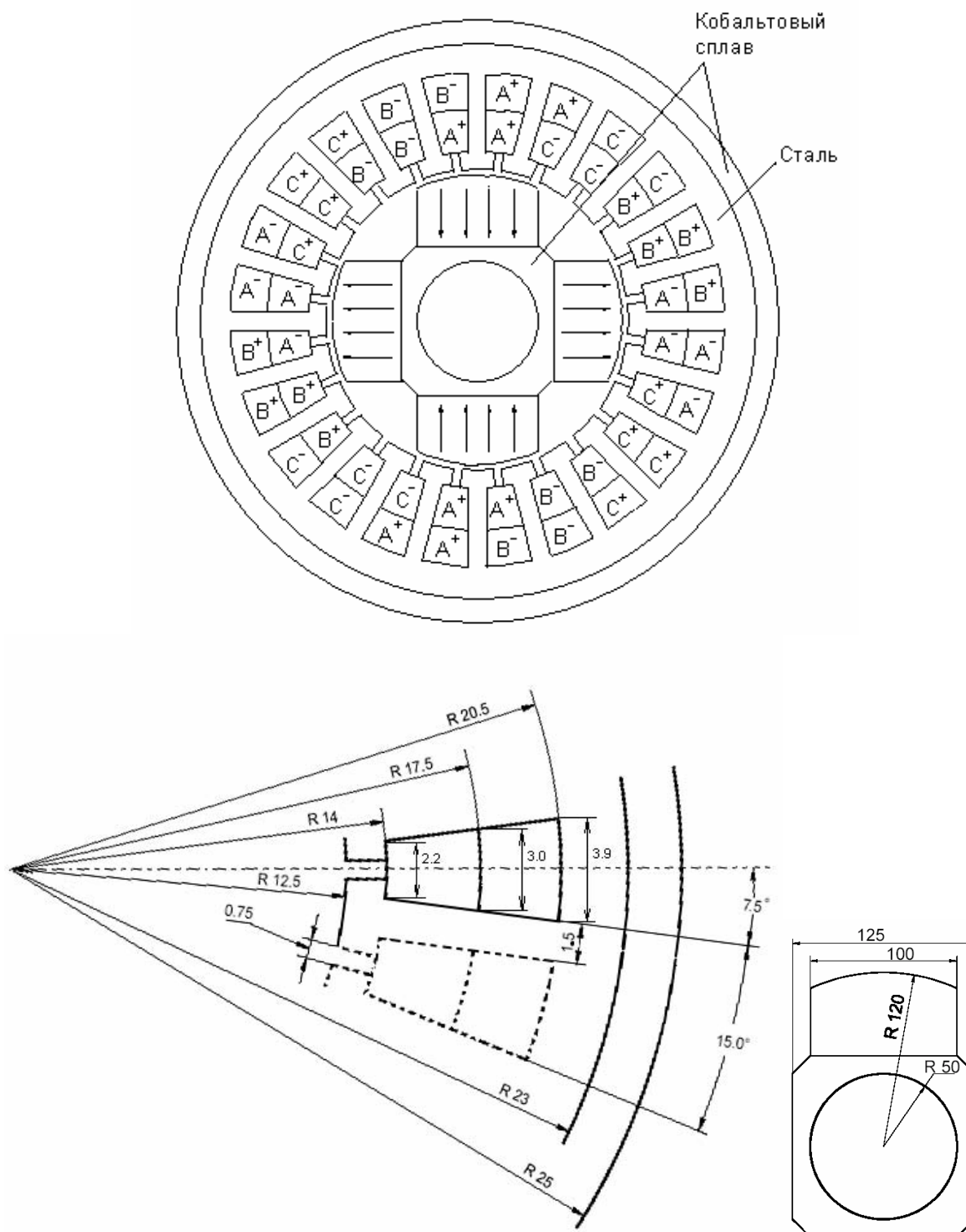
Объект: Бесщеточный двигатель переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов и трехфазной обмоткой статора.

Тип задачи: Магнитостатика

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

Рекомендуемый шаг дискретизации: 0.5 мм



При построении геометрической модели следует использовать возможности Elcut по дублированию объектов (с указанием числа копий объекта).

Все размеры заданы в миллиметрах и градусах, осевая длина двигателя 40 мм.

Четыре постоянных магнита изготовлены из сплава самарий-кобальт с относительной магнитной проницаемостью 1.154 и коэрцитивной силой 550000 А/м. Токи в фазах обмотки статора заданы следующим образом: 13.5 А в фазе А+, - 13.5 А в фазе А-, 13.5 А в В+, -13.5 А в В-, и нулевые значения в фазах С+ и С-. Ядро статора и сердечник ротора изготовлены из сплава кобальт-никель-медь.

Кривая намагничивания для кобальто-никелевого сплава:

H (А/м)	20	60	80	95	105	120
B (Тл)	0.19	0.65	0.87	1.04	1.18	1.24
H (А/м)	140	160	180	200	240	2500
B (Тл)	1.272	1.3	1.32	1.34	1.36	1.45

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

13. Индукционная тигельная печь

Задание: Рассчитать картины электромагнитного и теплового полей. Определить время нагрева загрузки до температуры 2500 °С. Определить ток в обмотке индуктора (в пересчете на один виток) необходимый для выравнивания температуры по всей загрузке на уровне 2500 °С.

Объект: Насос для перекачки жидкого металла

Тип задачи: Совмещенная задача магнитного поля переменных токов и нестационарной тепловой задачи.

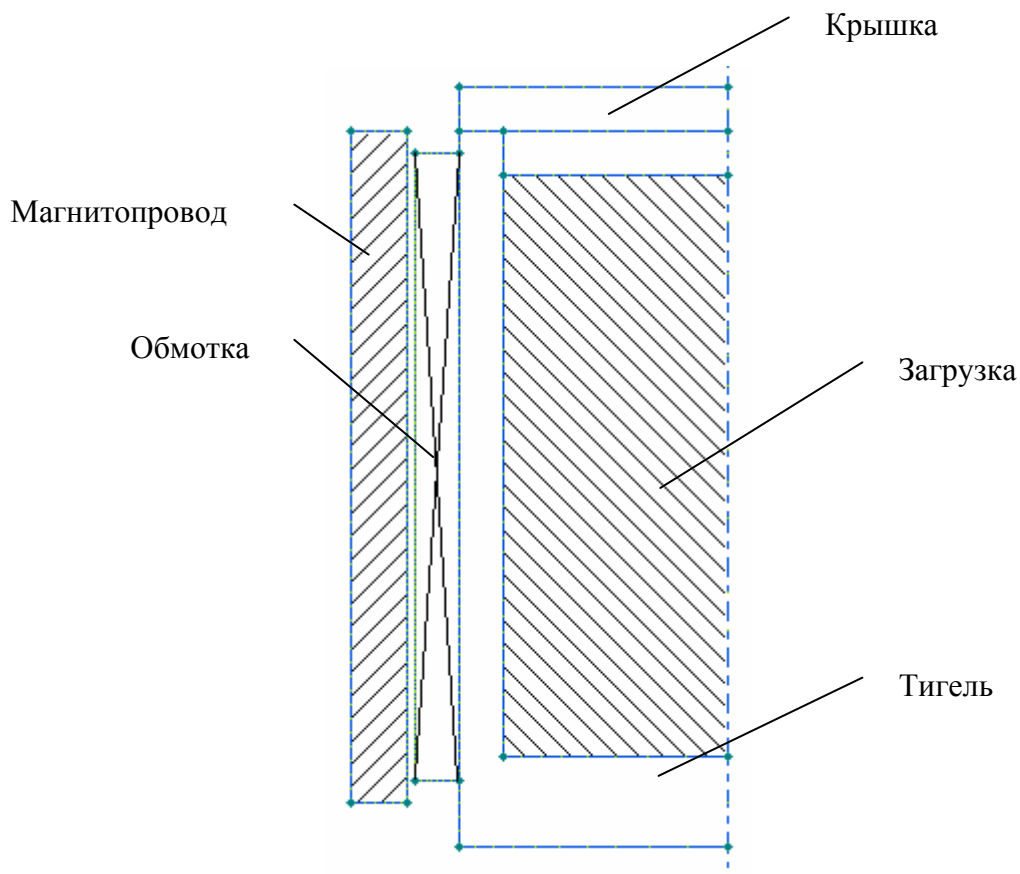
Класс задачи: Осесимметричная.

Геометрия:

Высота тигля – 1600 мм

Наружный диаметр тигля – 600 мм

Внутренний диаметр тигля – 500 мм
 Толщина дна тигля – 200 мм
 Толщина стенки тигля – 200 мм
 Высота загрузки – 1300 мм
 Высота обмотки – 1400 мм
 Толщина обмотки – 100 мм
 Высота магнитопровода – 1500 мм



Исходные данные:

Толщина магнитопровода – 125 мм
 Ток в обмотке индуктора (в пересчете на один виток) – 140 000 А
 Частота тока – 500 Гц

	Воздух	Тигель, крышка	Загрузка	Обмотка	Магнитопровод
Магнитная проницаемость μ , д.е.	1	1	1	1	100
Удельная электропроводность σ , См/м.	0	0	720000	56000000	0
Теплопроводность λ , Вт/(К·м)	0.024	0.128	25	25	15
Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	1000	1800	380	380	465
Плотность ρ , кг/м ³	1.2	1300	8950	8950	7833

14. Расчет поля подковообразного постоянного магнита

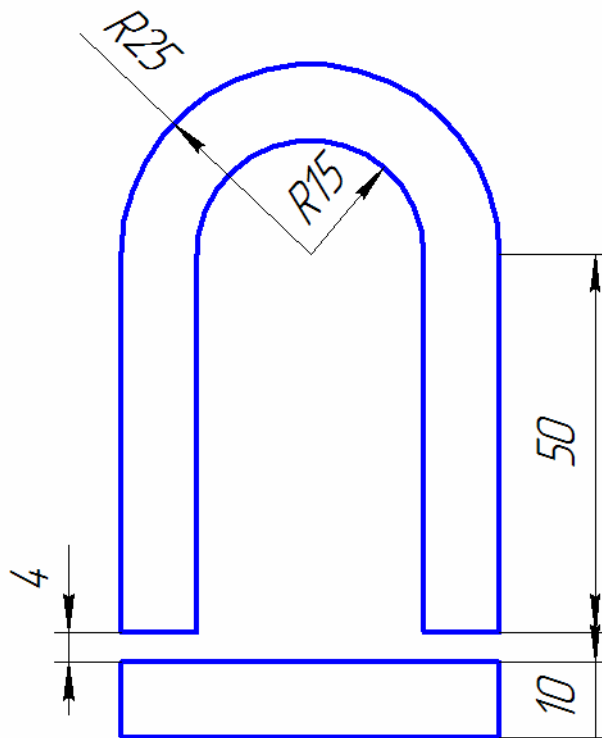
Задание: Рассчитать картину поля постоянного магнита, определить максимальное значение магнитной индукции. Определить зависимость продольной и поперечной составляющих усилия притяжения от смещения в поперечном (горизонтальном) направлении (10-15 точек). Определить зависимость усилия притяжения от ширины якоря (в пределах от 10 до 50 мм, 10-15 точек).

Объект: Постоянный магнит со стальным сердечником и якорем.

Тип задачи: Магнитостатика.

Класс модели: Плоская.

Геометрия модели (все размеры указаны в миллиметрах):



Исходные данные:

	Воздух	Магнит	Якорь
Магнитная проницаемость μ , о.е.	1	1000	100
Коэрцитивная сила, А/м	-	10000	-

Для моделирования коэрцитивной силы магнита на криволинейных участках следует задать на них граничные условия касательного поля:

$H_t = -9375 \text{ A / м}$ – для внешней криволинейной поверхности, и

$H_t = 10714 \text{ A / м}$ – для внутренней криволинейной поверхности.

15. Расчет индуктивности дросселя броневой конструкции

Задание: Рассчитать картину поля дросселя броневой конструкции, определить максимальное значение магнитной индукции.

Найти зависимость индуктивности дросселя от тока его обмотки (ток обмотки менять в пределах от $I_{\text{ном}}$ до $10I_{\text{ном}}$).

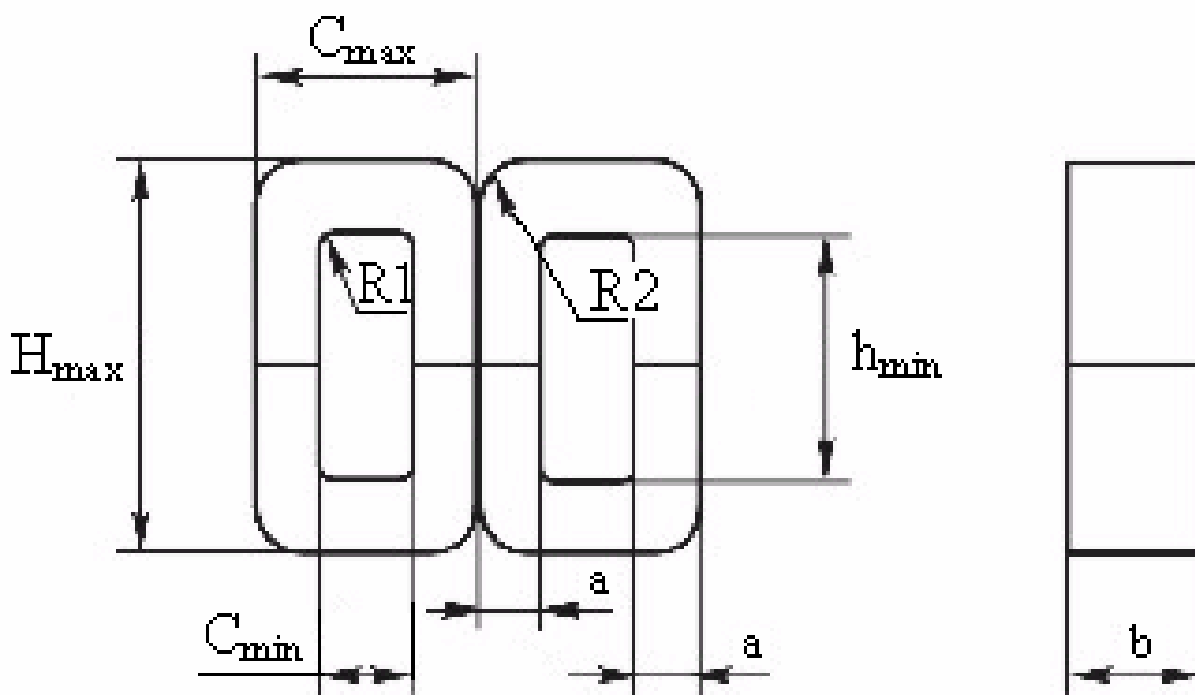
Найти зависимость индуктивности дросселя от величины воздушного зазора сердечника (величину воздушного зазора менять в пределах от $\delta_{\text{ном}}$ до $10\delta_{\text{ном}}$).

Объект: Постоянный магнит со стальным сердечником и якорем.

Тип задачи: Магнитостатика.

Класс модели: Плоская.

Геометрия модели (все размеры указаны в миллиметрах):



Исходные данные:

Тип	Габаритные размеры сердечника, мм							
	a	b	C _{min}	h _{min}	C _{max}	H _{max}	R1	R2
ШЛ40x80	20.0	80.0	40.0	100.0	81.0	142.5	20.0	10.0

Воздушный зазор между половинами сердечника $\delta_{\text{ном}} = 1$ мм.

H (А/м)	5.29	5.76	6.8	7.85	9.6	11.4	13.2	15.26	18.29	24.25	34.09	45.2	70.68
B (Тл)	0.15	0.22	0.33	0.45	0.64	0.84	1.03	1.216	1.326	1.447	1.534	1.611	1.666

H (А/м)	70.68	102.1	140	195.4	261.81	362.2	534.25	759.1	$1.12 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$	$1.89 \cdot 10^3$	$2.32 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$
B (Тл)	1.666	1.688	1.73	1.753	1.775	1.819	1.841	1.863	1.896	1.929	1.951	1.973	1.98

Число витков обмотки $w = 1000$

Номинальный ток $I_{\text{ном}} = 2$ А

Для определения индуктивности использовать «Мастер индуктивностей» (Вид\ Мастер индуктивностей).

16. Проводник в ферромагнитном пазу

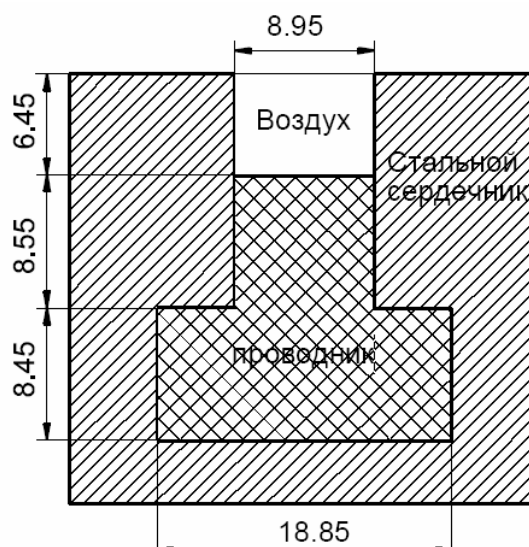
Задание: Найти распределение токов внутри проводника и его импеданс (полное сопротивление). Определить зависимость импеданса проводника от частоты тока в проводнике. Частоту тока изменять в пределах от 1 до 500 Гц (10-15 точек).

Объект: Проводник в ферромагнитном пазу

Тип задачи: Поле переменных токов

Класс модели: Плоская.

Геометрия модели (все размеры указаны в миллиметрах):



Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость воздуха – $\mu = 1$.

Магнитная проницаемость меди – $\mu = 1$.

Удельная электропроводность меди $\sigma = 57\,00000$ См/м.

Ток в проводнике $I = 1$ А

Базовая частота = 50Гц.

Граничные условия:

Предполагая бесконечную магнитную проницаемость стенок паза, заменим их граничным условием Неймана (Касательное поле, $\sigma = 0$), также предполагаем, что магнитный поток не выплескивается в воздушный зазор через верхнюю границу проводника, так что ее можно описать нулевым граничным условием Дирихле.

Комплексное сопротивление (импеданс) проводника на единицу длины может быть получен из уравнения:

$$Z = \frac{V}{I} ,$$

где V падение напряжения на единицу длины. Это падение напряжения может быть получено в окне анализа результатов расчета при помощи команды Локальные значения в меню Вид. В этом режиме следует щелкнуть мышью любую точку в пределах проводника.

17. Нестационарное температурное поле в зубцовой зоне электрической машины

Задание: Рассчитать процесс нагрева и охлаждения проводников в пазу электрической машины. Построить графики изменения температуры вдоль оси

паза (от дна паза к клину) для моментов времени $t = 0.3, 1, 1.5, 3.5, 5, 6.5, 8$ ч. Построить графики изменения температуры во времени в течение всего цикла нагрева и охлаждения на дне паза и на поверхности первого проводника.

Объект: Зубцовая зона статора синхронного двигателя.

Тип задачи: Нестационарная теплопередача.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия: из задачи №5

Исходные данные:

Предполагается однородное распределение температуры в двигателе, перед тем как он был внезапно включен в сеть. Условия охлаждения не меняются в процессе работы. После того как двигатель нагрелся до установившейся температуры, его отключают от сети, и начинается процесс остывания. Начальная температура для задачи остывания берется из предыдущей задачи нагрева. Условия охлаждения при остывании неизменны, но отличаются от тех, что были при нагревании.

Начальная температура зубцовой зоны 20°C .

Время нагрева – 3 ч.

Время охлаждения – 6.3 ч.

Удельная мощность тепловыделения в каждом проводнике: 180000 Вт/м^3 ;

	Сталь	Проводник	Изоляция	Клин
Теплопроводность λ , Вт/(К·м)	25	380	0.15	0.25
Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	465	380	1800	1500
Плотность ρ , кг/м ³	7833	8950	1300	1400

Граничные условия (конвекция):

	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(К·м ²)		Температура омывающего воздуха, С ⁰
	Двигатель включен	Двигатель выключен	
Внутренняя поверхность статора	250	20	40
Внешняя поверхность статора	70	70	20
Вентиляционный канал	150	20	40

18. Расчет индуктивности кабеля

Задание: Рассчитать картину магнитного поля четырехжильного кабеля. Определить зависимость индуктивности кабеля от частоты. Определить зависимость мощности тепловыделения в одной из жил кабеля от частоты. Частоту изменять в пределах 500-2500 Гц (10-15 точек). Расчеты выполнить для двух вариантов протекания токов в жилах кабеля.

Объект: Четырехжильный кабель.

Тип задачи: Магнитное поле переменных токов.

Класс модели: Плоская.

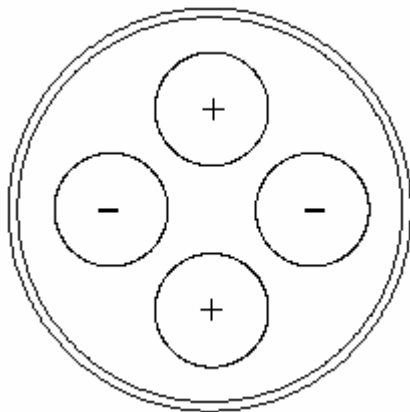
Геометрия модели:

Радиус жилы кабеля $r = 6.2$ мм

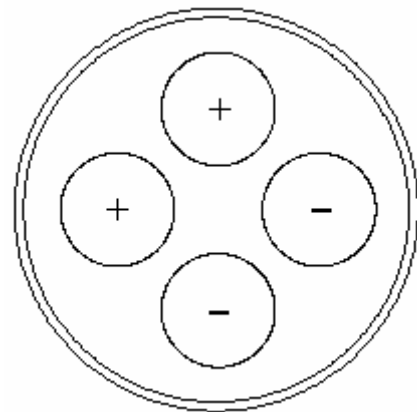
Радиус окружности, проходящей через центры жил $r_0 = 11$ мм

Внешний радиус оболочки кабеля $R = 22$ мм

Толщина оболочки кабеля $s = 1$ мм



а)



б)

Исходные данные:

Амплитуда тока в каждом проводнике $I_m = 226$ А

Удельная электропроводность меди $\sigma = 57000000$ См/м.

Относительная магнитная проницаемость воздуха, изоляции и оболочки $\mu=1$.

Удельная электропроводность изоляции и оболочки $\sigma = 0$ См/м.

19. Температурный отклик на быстрое изменение температуры внешней среды

Задание: Определить температурный отклик медного провода диаметром d , с начальной температурой T_0 , который быстро внесли в воздух с температурой T_i .

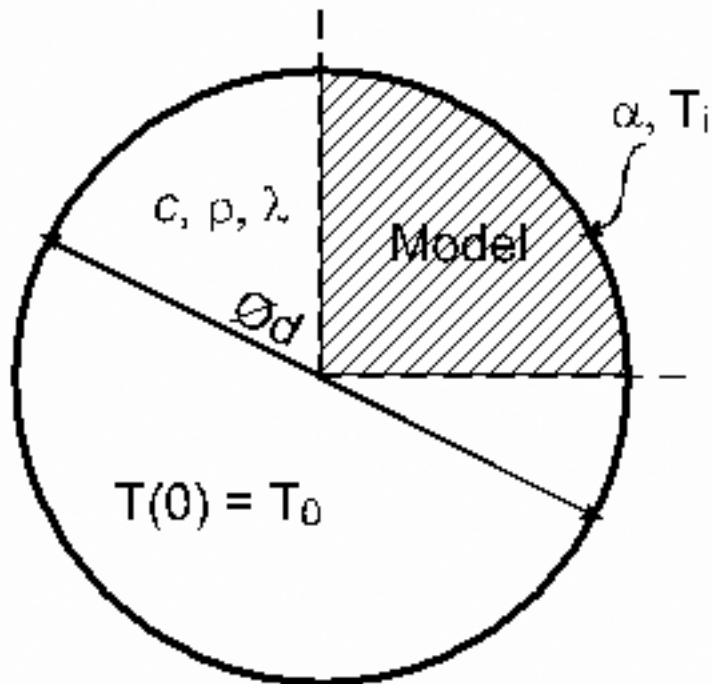
Объект: Медный провод.

Тип задачи: Нестационарная теплопередача.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

Диаметр провода $d = 0.015625$ дюймов.



Исходные данные:

Начальная температура провода $T_0 = 148.88\text{C}$.

Температура окружающей среды $T_i = 37.77\text{C}$.

Теплоемкость провода $C = 380.16 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

Плотность провода, $\rho = 8966.04 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Теплопроводность $\lambda = 380 \text{ Вт}/(\text{K}\cdot\text{м})$

Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности провода $\alpha = 11.37 \text{ Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$.

20. Изменение распределения температуры в пластине из ортотропного материала

Задание: Длинная металлическая пластина прямоугольного сечения изначально имела температуру T_0 . Потом её быстро погрузили в жидкость с температурой T_i . Пластина имеет различные коэффициенты теплопроводности в направлении X и Y . Определить изменение температуры во времени в различных точках пластины.

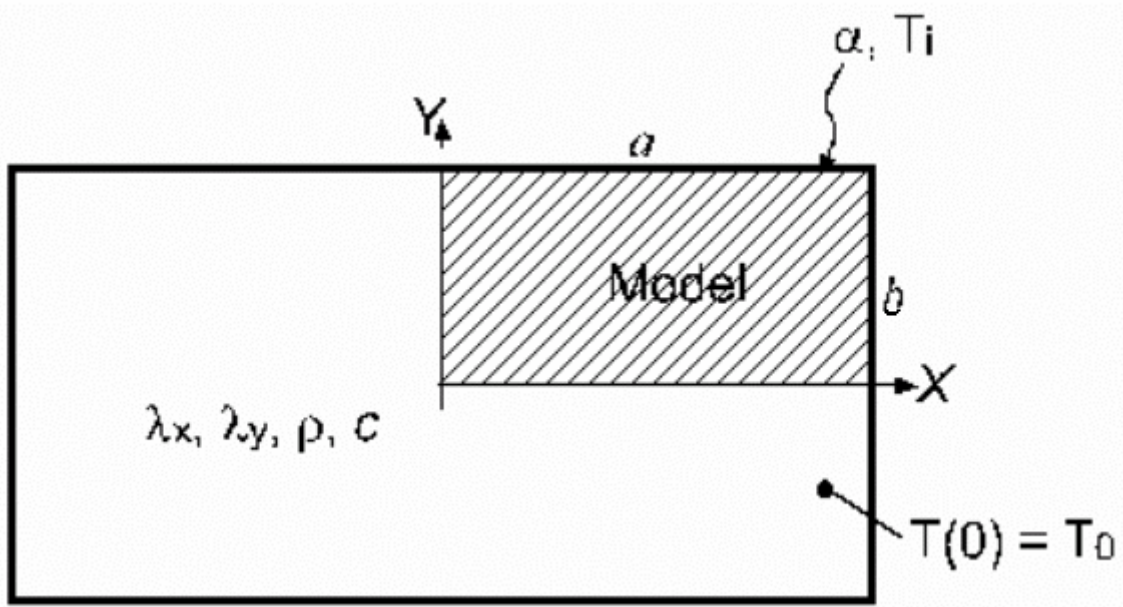
Объект: Пластина из ортотропного материала

Тип задачи: Нестационарная теплопередача.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

Размеры $a = 2$ дюйма, $b = 1$ дюйм



Исходные данные:

Теплопроводность $\lambda_x = 34.6147$ Вт/(К·м), $\lambda_y = 6.2369$ Вт/(К·м).

Температура окружающей среды $T_i = 37.78$ С.

Начальная температура пластины $T_0 = 260$ С.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от краев пластины $\alpha = 1361.7$ Вт/(К·м²).

Теплоемкость $C = 37.688$ Дж/(кг·К).

Плотность, $\rho = 6407.04$ кг/м³.

21. Расчет напряженного состояния тонкой перфорированной пластины

Задание: Определить изменение размеров центрального отверстия пластины (по вертикали и по горизонтали) при приложении к нижнему краю пластины растягивающего и сжимающего усилия 40 Н/м^2 .

Объект: Тонкая прямоугольная пластина с круглым отверстием посередине, нагруженная растягивающим усилием.

Тип задачи: Задача напряжений и деформаций

Класс задачи: Плоская.

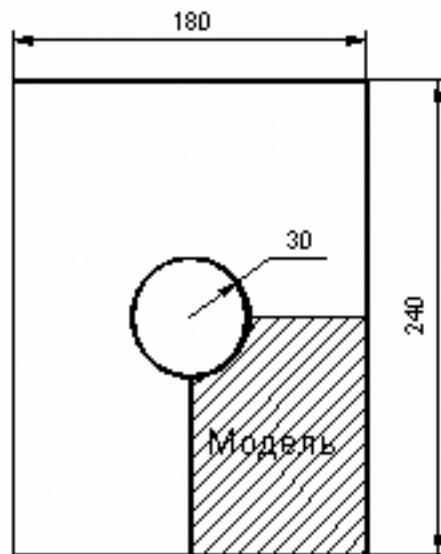
Геометрия (все размеры указаны в миллиметрах):

Длина: 240 мм;

Ширина: 180 мм;

Радиус центрального отверстия: 30 мм;

Толщина: 5 мм.



Исходные данные:

Модуль Юнга $E = 207000 \text{ Н/м}^2$.

Коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$

Модуль сдвига $E = 79615.4 \text{ Н/м}^2$.

Граничные условия:

Верхний край пластины – Фиксированное перемещение по $Y = 0$.

Нижний край пластины – Поверхностная сила $f_x = -40 \text{ Н/м}^2$ (для растягивающего усилия) и $f_x = 40 \text{ Н/м}^2$ (для сжимающего усилия).

По вертикальной оси симметрии – Фиксированное перемещение по $X = 0$.

На вертикальных краях пластины граничные условия не задаются.

22. Соленоидальный электромагнит установки термоядерного синтеза Токамак

Задание: Определить изменение размеров электромагнита.

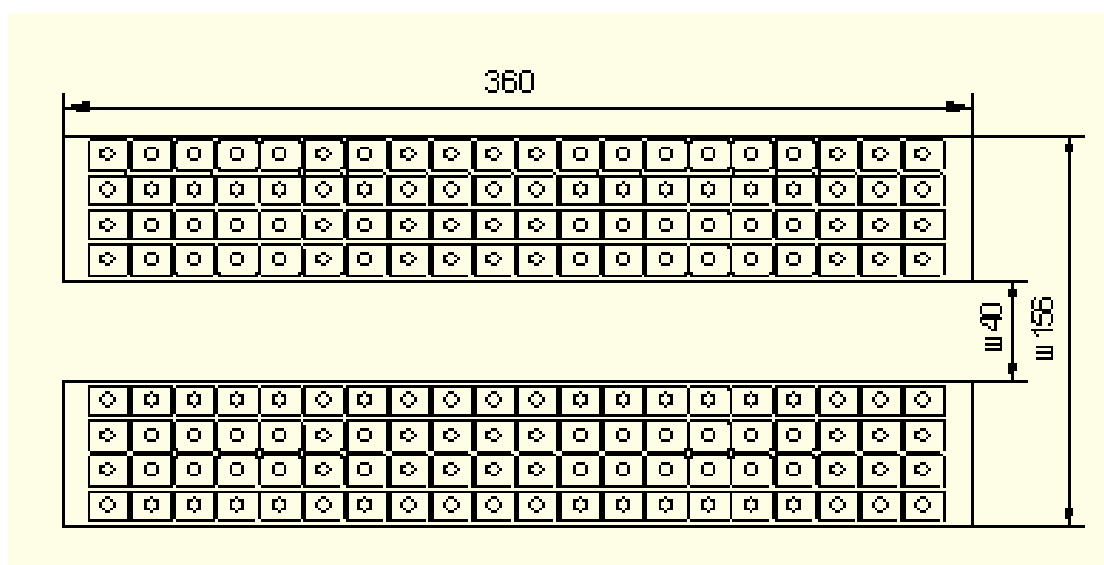
Объект: Тонкая прямоугольная пластина с круглым отверстием посередине, нагруженная растягивающим усилием.

Тип задачи: Совмещенная магнито-упругая задача

Класс задачи: Осесимметричная

Геометрия (все размеры указаны в сантиметрах):

Соленоид состоит из 80 сверхпроводящих витков с каналами для жидкого гелия, закрепленных в пластиковой матрице. Ввиду симметрии в модели представлена половина магнита.



Исходные данные:

Данные для магнитной задачи:

Плотность тока в витках катушки $j = 3e8$ А/м;

Магнитная проницаемость пластика, проводникового материала и жидкого гелия внутри проводников $m = 1$.

Данные для задачи расчета упругого состояния:

Медные проводники:

Модуль Юнга $E = 7.74e10$ Н/м²;
Коэффициент Пуассона $\nu = 0.335$;
Предельное допустимое напряжение: $2.2e8$ Н/м.

Пластиковая матрица:

Модуль Юнга $E = 2e11$ Н/м²;
Коэффициент Пуассона $\nu = 0.35$;
Предельное допустимое напряжение: $1e9$ Н/м.

23. Полый толстостенный цилиндр, подвергнутый нагреву и давлению

Задание: Необходимо рассчитать распределение механических напряжений в цилиндре.

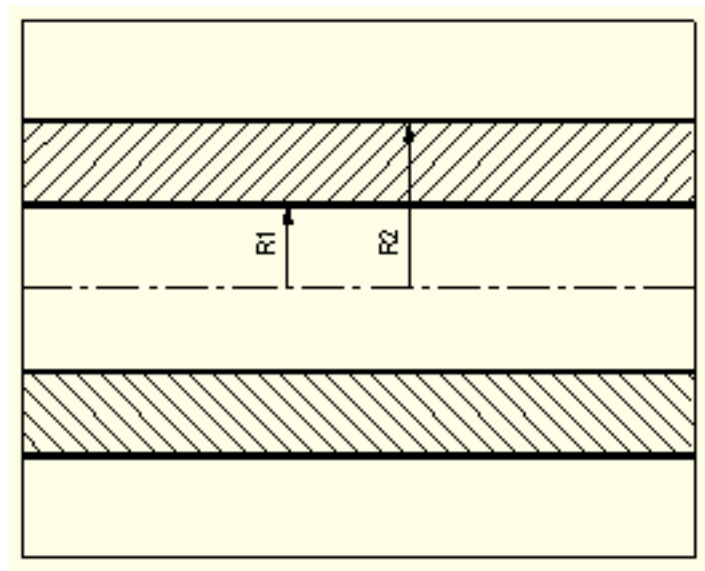
Объект: Полый толстостенный цилиндр

Тип задачи: Совмещенная термоупругая задача

Класс задачи: Осесимметричная

Геометрия (все размеры указаны в сантиметрах):

Весьма длинный толстостенный цилиндр нагружен давлением изнутри. Кроме того, на его внутренней поверхности поддерживается постоянная температура T_i а на наружной поверхности T_o .



Исходные данные:

Размеры цилиндра $R_1 = 1$ см, $R_2 = 2$ см;

Теплопроводность цилиндра $\lambda = 1$ Вт/К·м
Температура внутренней поверхности $T_i = 100^\circ\text{C}$;
Температура наружной поверхности $T_o = 100^\circ\text{C}$;
Коэффициенты температурного расширения $\alpha = 1 \cdot 10^{-6}$ 1/К;
Давление во внутренней полости $P = 1 \cdot 10^6$ Н/м²;
Модуль Юнга $E = 3 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
Модуль сдвига $G_{zt} = 1.15 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
Коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$.

Примечание:

Поскольку никакие физические величины не зависят от координаты z , задача является одномерной, и мы можем в качестве модели выбрать тонкий срез цилиндра. Установим произвольно осевую длину цилиндра равной 0.2 см. Осевое смещение на боковых сторонах цилиндра положим равным нулю, чтобы отразить влияние отброшенных бесконечных частей цилиндра.

Для тепловой задачи примем, что тепловой поток через боковые поверхности модели цилиндра равен нулю.