

Основы теории индукционного нагрева



Содержание

1. Что такое индукционный нагрев?
2. ЭМ процессы в идукционных системах
3. Поглощение мощности нагреваемыми телами
4. ЭМ эффекты в индукционных системах:
 - Эффект концентратора
 - Эффект близости
 - Концевые эффекты в цилиндрических системах
 - Концевые и краевые эффекты при нагреве прямоугольных тел



Плавка стекла в индукторе 1500 мм диаметром
EFD Induction

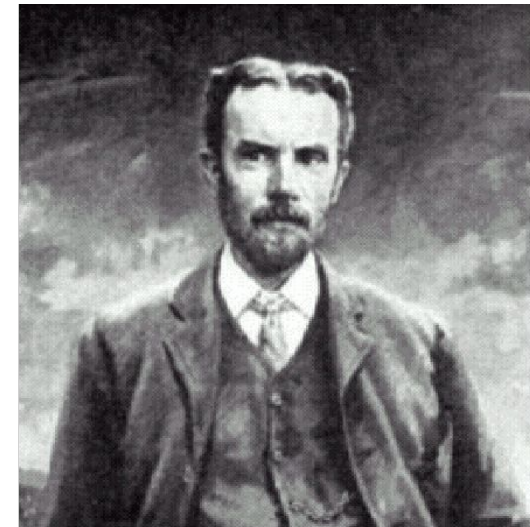
Теория индукционного нагрева



M. Faraday (1791-1867)



J.C. Maxwell (1831-1879)



Oliver Heaviside (1850-1925)

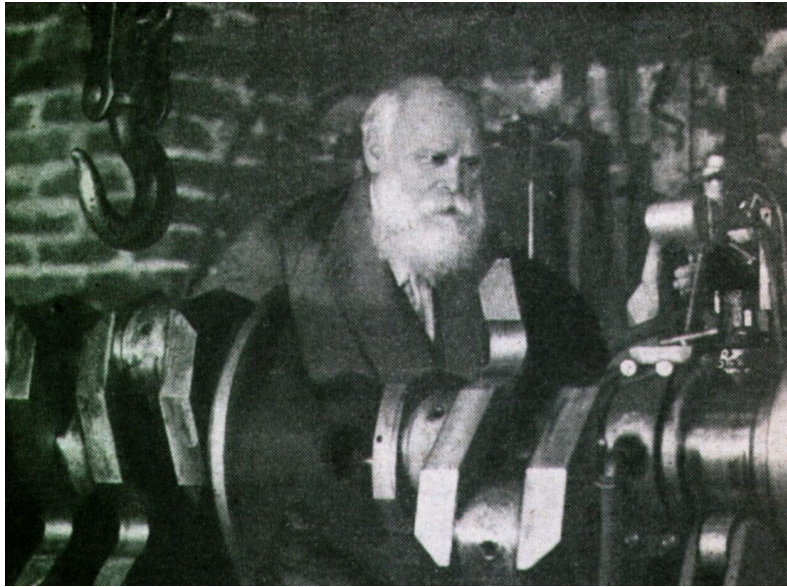
Индукционный нагрев, как и всё *электро-* и *радио-*, основано на открытиях и работах великих учёных – М.Фарадея, Дж. Максвелла, Ж.Фурье, О. Хевисайда, Г. Герца и многих других

Непосредственно теория и практика индукционного нагрева основана на работах Э. Нортрупа, Ж. Рибо, В. Вологодина, Н. Родигина, А. Слухоцкого и других

История Индукционного Нагрева и Плавки описана в книге А. Muhlbauer “History of Induction Heating and Melting”, Vulkan Verlag, 2008

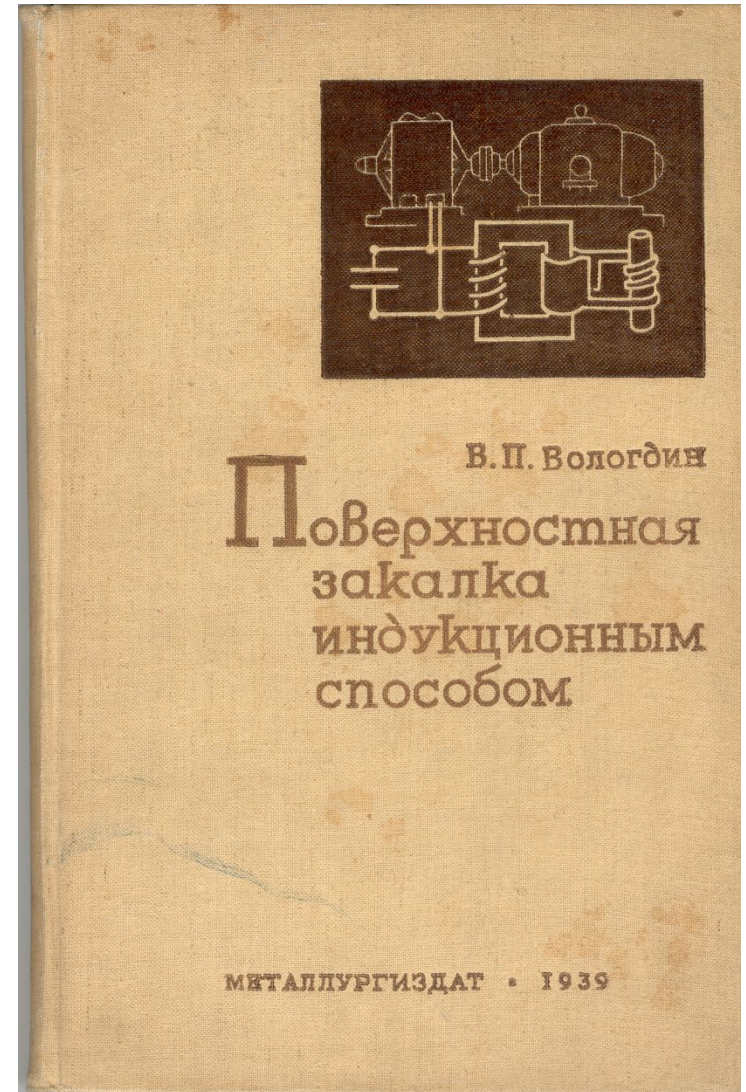
“Насущное отходит вдаль, а давность, приблизившись, приобретает явность”, Фауст

Теория индукционного нагрева



Теория поверхностной закалки впервые была разработана проф. В.П. Вологдиным в сотрудничестве с талантливым математиком Г.А. Разореновым и опубликована в книге 1939 года

Теория включала как электромагнитные и тепловые, так и металлургические явления



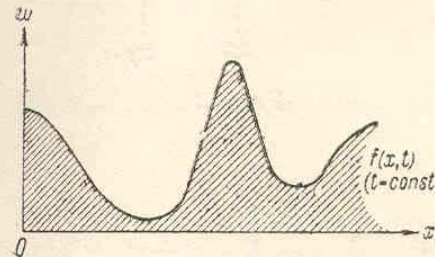
ТЕОРИЯ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПОД ЗАКАЛКУ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ μ С ТЕМПЕРАТУРОЙ. ЗАКАЛКА НА „ВЫСОКОЙ“, „СРЕДНЕЙ“ И „НИЗКОЙ“ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ ПРИ $200 > x_k \sqrt{f} > 3$

До 1970-х годов теория индукционного нагрева основывалась на результатах экспериментов и на трудоёмких и недостаточно точных аналитических методах

С начала 70-х годов всё большее значение стало приобретать использование ЭВМ, сначала в основном для расчёта по аналитическим формулам, затем с помощью различных численных методов:

- Методы интегральных уравнений
- Методы конечных разностей
- Методы конечных элементов

5. Четвертая подготовительная задача (рис. 30)



Источники тепла заданы непрерывной функцией координаты x и времени t :

$$w = f(x, t). \quad (62)$$

Рис. 30.

Решение:

$$U = \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^\infty dx \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\vartheta}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x+z)^2}{4a(t-\vartheta)} \right] + \exp \left[-\frac{(x-z)^2}{4a(t-\vartheta)} \right] \right\} f(x, \vartheta) d\vartheta. \quad (63)$$

Порядок интегрирования может быть изменен, после чего решение принимает вид:

$$U = \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \frac{d\vartheta}{\sqrt{t-\vartheta}} \int_0^\infty \left\{ \exp \left[-\frac{(x+z)^2}{4a(t-\vartheta)} \right] + \exp \left[-\frac{(x-z)^2}{4a(t-\vartheta)} \right] \right\} f(x, \vartheta) dx. \quad (64)$$

Теория индукционного нагрева

- Индукционный нагрев получил широкое распространение в промышленности, науке и даже в быту
- Индукционный нагрев основан на следующих физических явлениях:
электромагнетизм, теплопередача, металлургические трансформации, МГД процессы (в жидком металле) и др.
- Практика разработки индукционных систем основана на знании принципов их работы, применении определенных правил, формул и зависимостей, созданных экспериментально или на основе теоретических методов (аналитических и позже числовых)
- В настоящее время наиболее совершенной является разработка индукционных систем на основе компьютерного моделирования
- Знание физических основ и теории индукционного нагрева необходимо как для разработки или выбора индукционных систем, так и для их оптимальной эксплуатации
- Использование компьютерного моделирования существенно облегчает разработку и использование индукционных систем, но при этом знание теории остаётся необходимым

Что такое индукционный нагрев?

Индукционный нагрев – это метод бесконтактного нагрева тел, основанный на поглощении энергии из **Переменного Магнитного Поля**, генерируемого индуктором*

Существует два механизма поглощения:

- нагрев вихревыми токами, индуцируемыми магнитным полем внутри нагреваемого тела
- гистерезисный нагрев (только для магнитных материалов!) - нагрев вследствие трения магнитных микрообъёмов (доменов), которые поворачиваются под воздействием внешнего магнитного поля

* Существует также особый вид Индукционного нагрева, при котором нагреваемое тело быстро движется/вращается в сильном **ПОСТОЯННОМ** магнитном поле. Этот вид нагрева (Нагрев Индукцией Движения) в данном курсе не рассматривается.

Вихревые токи и гистерезис

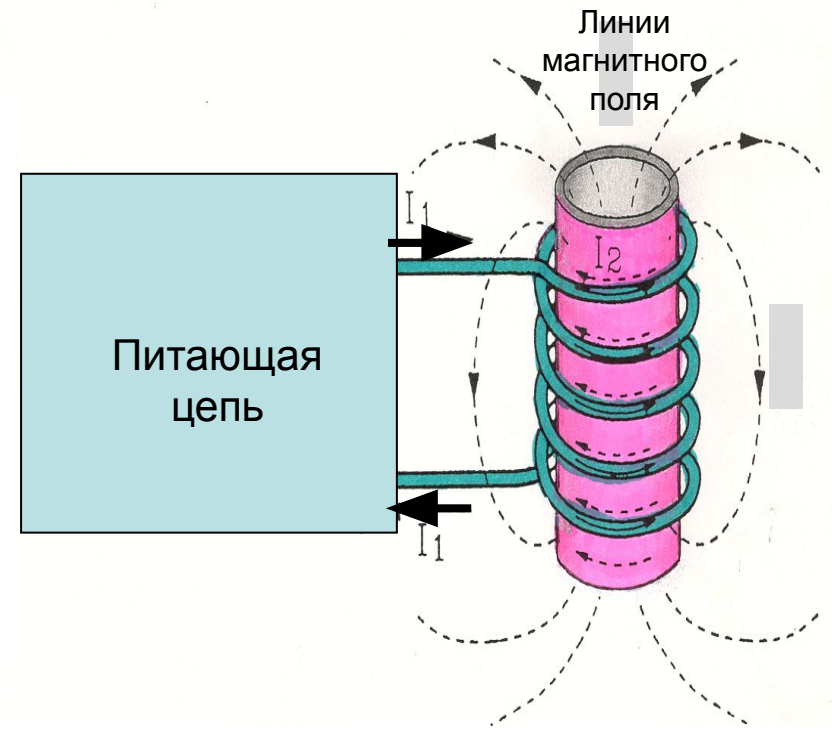
Нагрев **вихревым током** происходит во всех **проводящих** материалах (магнитных или немагнитных сталях, меди, алюминии, графите, жидком стекле или окислах и т.д.) когда они расположены в поле переменного тока. Вихревой ток всегда течет по замкнутому контуру (**закон природы!**) и для эффективного нагрева должен быть легкий путь для протекания этого тока. Например, легко нагреть проволочную петлю, но трудно нагреть незамкнутый контур из тонкой проволоки

Гистерезисный нагрев равен нулю в немагнитных материалах (алюминий, медь, нагретая сталь) или способен вызвать сравнительно небольшой нагрев в компактных магнитных телах (в основном стали при низких и средних температурах). Однако, в порошковых металлах (включая магнитные концентраторы) гистерезис может быть основным источником тепла. Каждая частица или микрообъем греются индивидуально; тело может иметь любую форму и размер (массивные тела, листы, пленки, проволока).

Как происходит индукционный нагрев?

Последовательность явлений:

1. Источник генерирует ток (I_1) в индукторе
2. Ток индуктора (ампер-витки) создает магнитное поле. Линии поля всегда замкнуты (**закон природы**) и располагаются вокруг проводника в плоскости, перпендикулярной к направлению тока
3. Возникшее магнитное поле индуцирует в поперечном сечении нагреваемой детали электрическое поле (напряжение)
4. Напряжение вызывает вихревые токи (I_2) в нагреваемой детали, текущие в направлении противоположном току индуктора
5. Вихревые токи нагревают деталь



Токи и потоки в индукционном устройстве

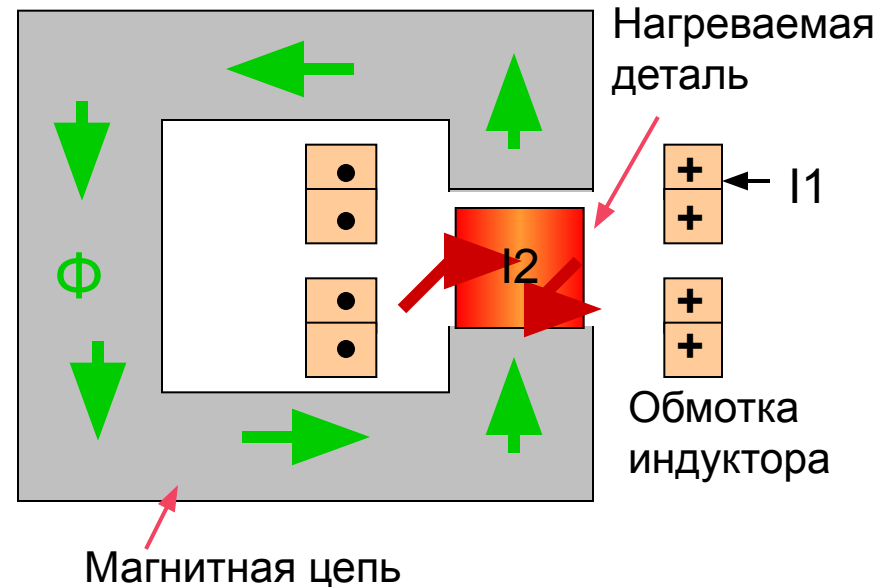
- В каждом индукционном устройстве существует три замкнутых цепи:

Цепь тока индуктора (I_1)

Цепь магнитного потока (Φ)

Цепь вихревого тока (I_2)

- Цепь магнитного потока может быть в виде магнитного сердечника, как у индуктора трансформаторного типа (рис. справа) или может быть невидимой (в воздухе или ином непроводящем материале)
- Цепь магнитного потока является чрезвычайно важным элементом индукционной системы, управлять которым можно с помощью магнитных контроллеров, улучшая качество нагрева и/или параметры системы



Линии магнитного поля

Линии магнитного поля представляют собой линии плотности магнитного потока B . Они позволяют «визуализировать» распределение магнитного поля. Большая концентрация магнитных линий соответствует большей плотности магнитного потока

Линии всегда замкнуты вокруг создающего их источника

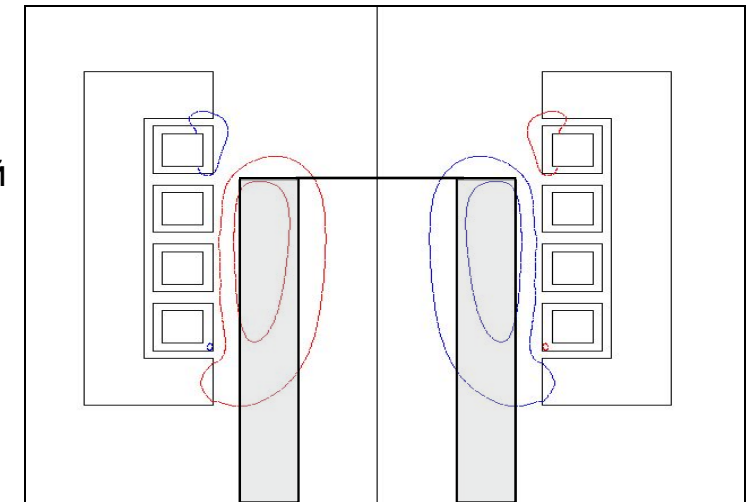
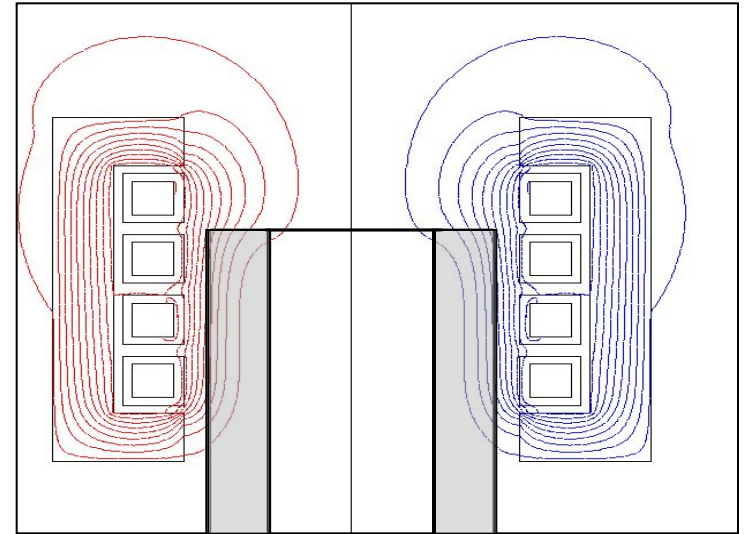
В индукционных системах ток индуктора в течение цикла изменяется от максимума до нуля, затем до максимума в противоположном направлении, снова до нуля и затем максимума. Рисунок магнитных линий существенно изменяется в течение периода электромагнитных колебаний

Пример: Нагрев конца немагнитной трубы индуктором с концентратором.

Верхний рисунок – рисунок линий магнитного поля при максимальном мгновенном значении тока индуктора. Голубые линии показывают направление линий по часовой стрелке, красные-против

Нижний рисунок – мгновенное значение тока индуктора близко к нулю и магнитное поле образуется в основном вихревыми токами, существующими в трубе

Рисунок магнитных линий очень важен для анализа результатов компьютерного моделирования; визуализация линий в неправильный момент может стать причиной неверной интерпретации результатов



Динамика магнитных линий

Электромагнитные процессы в индукционных установках

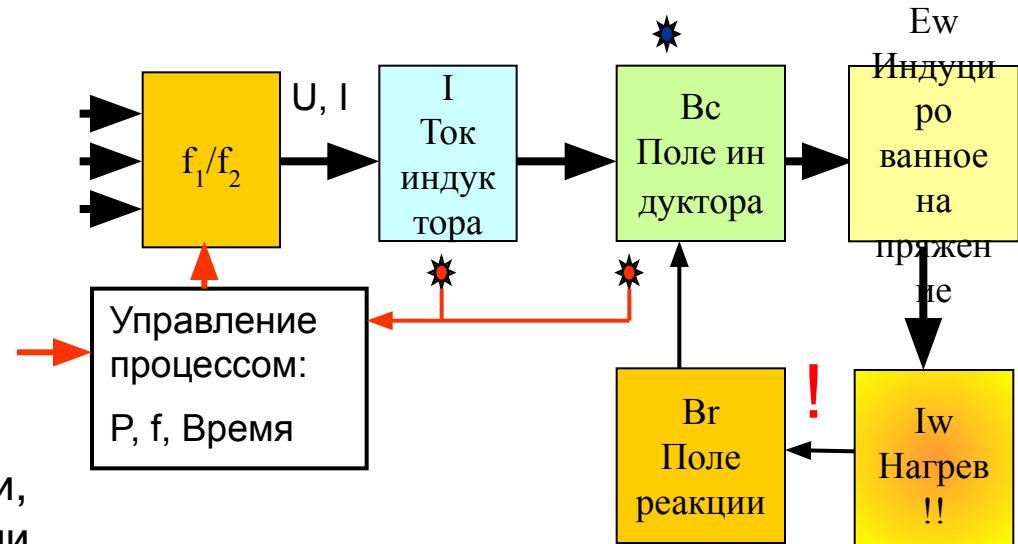
f_1/f_2 – преобразователь частоты (источник)

B_c – плотность магнитного потока, созданная индуктором (поле возбуждения)

E_w – напряжение, индуцированное внутри рабочего образца, которое вызывает вихревой ток I_w

B_r – плотность потока поля реакции, которое “обратно связано” с витками индуктора

B_r вызывает изменение параметров индуктора в процессе нагрева, когда свойства материала нагреваемого изделия меняются с температурой



- ★ Зона контроля магнитного потока
- ★ Точки сигналов обратной связи, которые могут быть использованы в замкнутой цепи управления и для мониторинга

Схема индукционной цепи с сенсорами

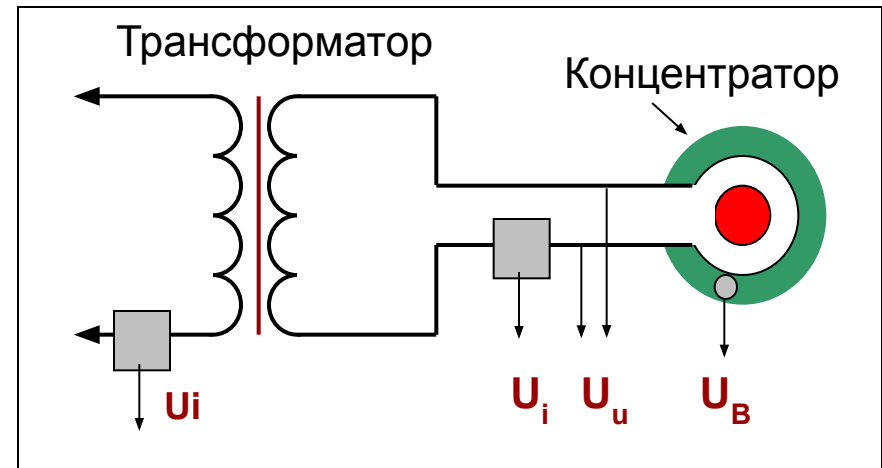
Сигналы тока и напряжения широко используются для процесса мониторинга и контроля

Современные генераторы могут работать в режиме постоянного напряжения, тока или мощности

Сигнал U_B , пропорциональный плотности потока в определенной точке индуктора, может быть использован для мониторинга интенсивности нагрева и правильной установки нагреваемой детали.

Например, с помощью этого сигнала можно определить что нагреваемая деталь нецентрирована или имеет трещины

Сенсоры магнитного потока могут быть установлены в концентраторе



U_i – Сигнал тока

U_u – Сигнал напряжения

U_B – Сигнал плотности потока

Передача мощности в индукционных установках

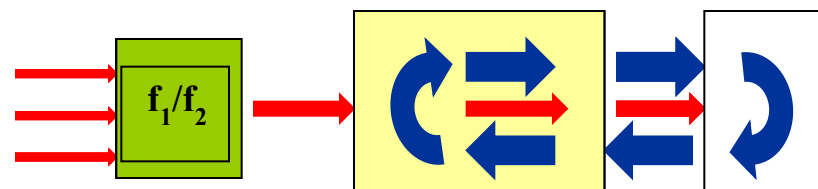
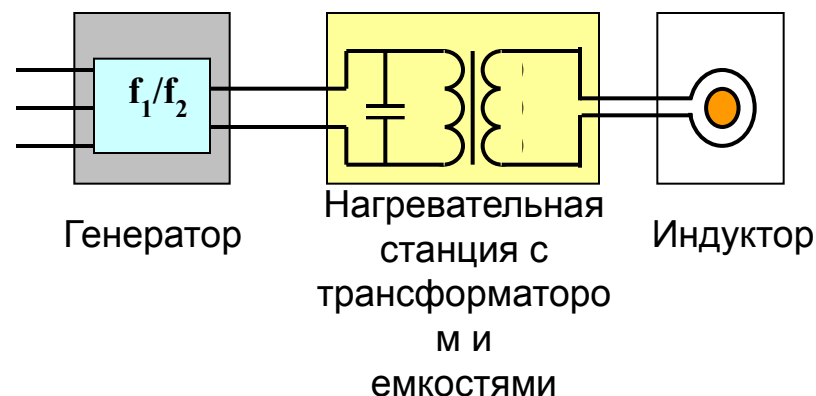
Переменный ток изменяет направление дважды в течение каждого периода. Если частота 1 кГц, ток меняет направление 2000 раз в секунду

Произведение тока и напряжения дает величину мгновенной мощности ($p = i \times u$), которая перемещается от генератора к индуктору. Мы можем сказать, что мощность частично поглощается (**Активная Мощность**) и частично отражается индуктором (**Реактивная мощность**).

Емкостные батареи служат для разгрузки генератора от реактивной мощности.

Емкости получают реактивную мощность от индуктора и посылают ее обратно к индуктору, осуществляя колебания мощности

Цепь “индуктор-трансформатор-емкости” называется **резонансной**



Активная мощность, кВт



Реактивная мощность, кВар

Глубина проникновения

Глубина проникновения – основная величина в теории и практике индукционного нагрева

Обычно это название связывают с утверждением, что магнитное поле проникает на указанную глубину от поверхности и весь нагрев происходит внутри этого слоя. Это утверждение не совсем правильно

Реально магнитное поле, ток и мощность распределяются внутри нагреваемого тела различным образом в зависимости от формы тела (плоское, цилиндрическое, сложная форма), размера, материала и частоты. Распределение зависит также от изменения свойств материала по глубине в связи с магнитным насыщением, температурным влиянием или композицией материала (многослойные тела и т.д.)

Глубина проникновения δ - это **относительная величина**, имеющая размерность длины, но зависящая **только** от свойств материала и частоты, т. е. не зависящая от формы тела и размера. Для неоднородного материала δ считается обычно для свойств на поверхности тела. Глубина проникновения пропорциональна корню квадратному из удельного сопротивления материала ρ и обратно пропорциональна корню квадратному из относительной магнитной проницаемости μ и частоты. Можно сказать, что δ – это тот стандарт длины, которым “определяется” поведение электромагнитного поля в материале

$$\delta = k \sqrt{\rho / f \mu}$$

Коэффициент k зависит от выбранной системы единиц

Система	ρ	f	δ	k
Метри- ческая	мкОмсм	кГц	мм	1.6

Глубина проникновения (прод.)

В **толстых плоских пластинах** плотность вихревого тока падает экспоненциально и на глубине δ плотность тока составляет 37% от его значения на поверхности

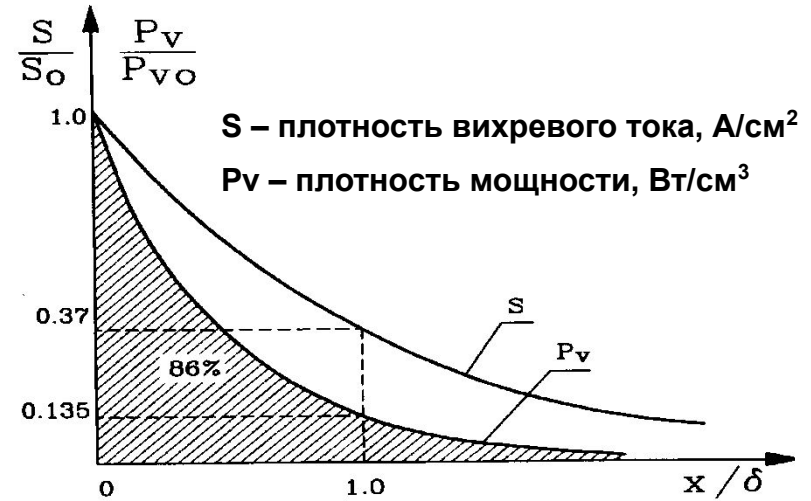
Плотность мощности падает как квадрат плотности тока и на глубине δ составляет 13.5% его значения на поверхности

Это позволяет утверждать, что **почти** вся мощность генерируется внутри слоя δ

Если толщина тела или радиус много больше, чем δ можно считать, что **поверхностный эффект** хорошо выражен и тело можно считать плоским

При нагреве магнитных деталей распределение мощности может сильно отличаться от экспоненциального.

В телах с переменными свойствами глубина проникновения рассчитывается для поверхности $\delta = \delta_e$



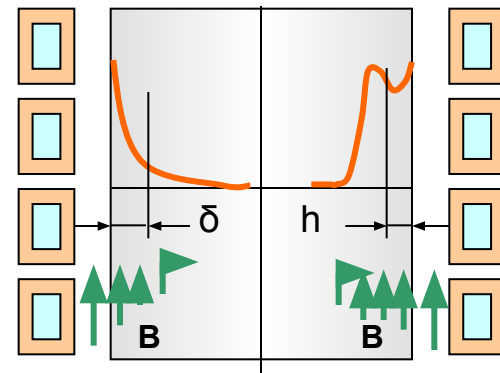
Примеры распределения мощности в цилиндрических телах

Существуют сложные аналитические формулы для распределения тока и мощности в цилиндрах, однако они достаточно точны только для однородных тел. В настоящее время используются методы Компьютерное моделирование даёт точные результаты при произвольных свойствах тел

Распределение плотности мощности (красные линии) и плотности потока B (зеленые стрелки) в сплошном цилиндре:

Слева – немагнитные тела; δ – глубина проникновения

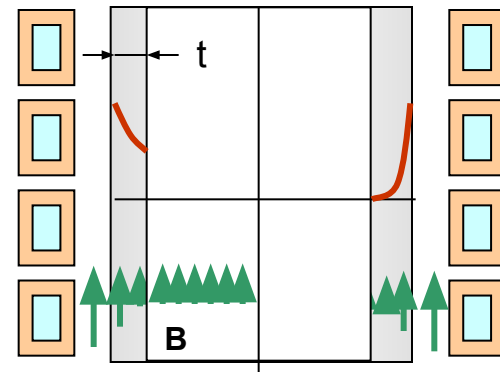
Справа – магнитная сталь в конце закалки, когда внешний слой потерял магнитные свойства; h – аустенизированный слой, который будет закален после охлаждения



Распределение плотности мощности и магнитного потока в трубе:

Слева – низкая частота (толщина стенок много меньше, чем глубина проникновения δ). Магнитное поле проникает внутрь трубы

Справа – высокая частота (стенка трубы толще, чем глубина проникновения). Распределение такое же как в сплошном цилиндре

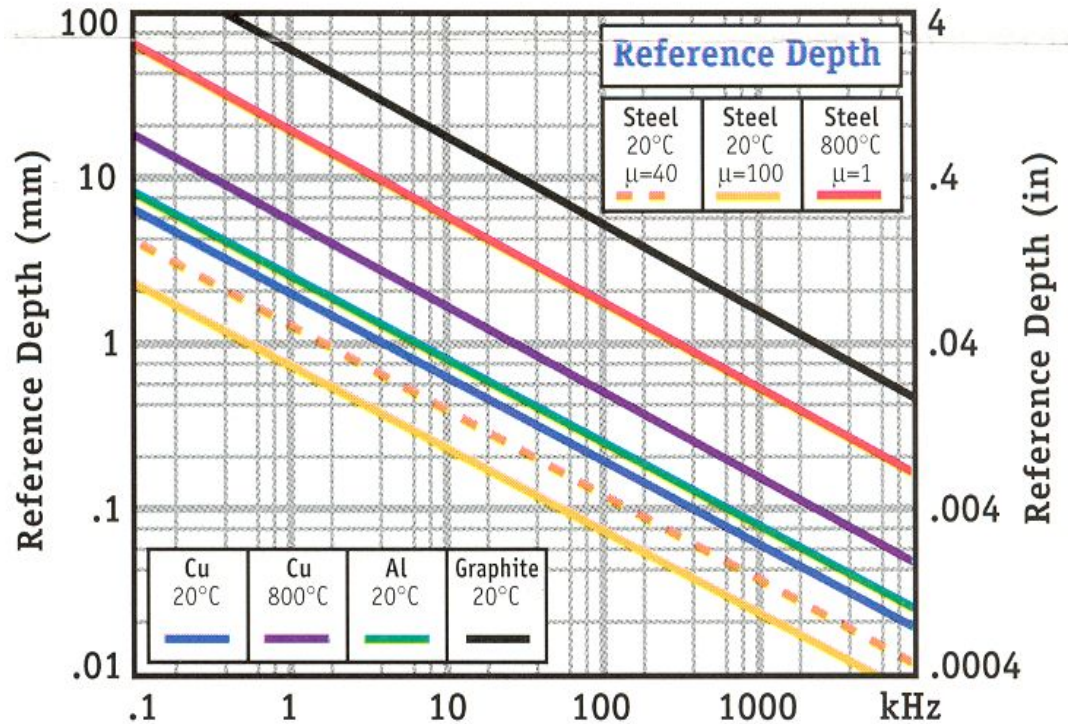


Глубина проникновения для различных материалов и частот

Глубина проникновения – единица длины, которая может быть использована для оценки электромагнитных процессов в электропроводном теле (медь индуктора, нагреваемое тело, структурные компоненты и т.д.)

При сквозном нагреве нужно сравнить диаметр детали и δ . Если диаметр тела меньше, чем глубина проникновения, поглощение мощности низкое и нагрев не эффективный (тело “прозрачно” для магнитного поля)

При закалке нужно сравнить требуемую глубину закаленного слоя и δ для оценки правильности выбранной частоты



Обычно используется логарифмическая шкала для частоты и δ в широком диапазоне

Мощность, поглощаемая нагреваемым телом

Для нагреваемых деталей простой формы (плоских или цилиндрических), помещенных в однородное магнитное поле, поглощенная мощность может быть рассчитана аналитически

Во многих случаях, как, например, сквозной нагрев длинных деталей, такой подход является достаточно точным. Он дает ясное представление о соотношении мощности, частоты и свойств нагреваемого тела

В случае неоднородного магнитного поля и сложных форм нагреваемой детали адекватные результаты можно получить только с помощью компьютерного моделирования

$$P_w = \frac{\rho}{\delta} AKH^2$$

P_w – мощность, поглощаемая деталью

ρ – удельное электрическое сопротивление материала

δ – глубина проникновения

A – поверхность нагреваемой детали, находящаяся под воздействием магнитного поля

H – напряженность магнитного поля

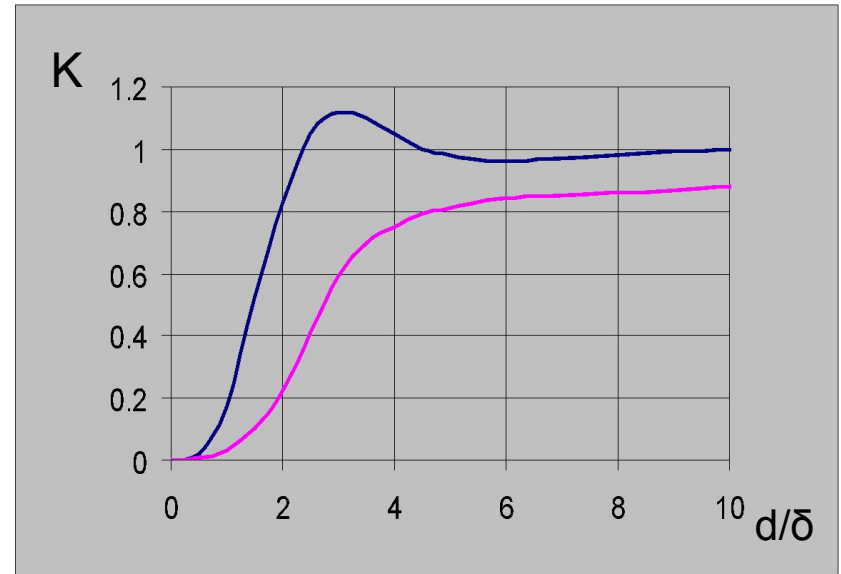
K – коэффициент поглощения мощности, зависящий от конфигурации детали, свойств материала и частоты

Коэффициент поглощения для пластин и цилиндров

Когда толщина или диаметр детали меньше глубины проникновения, то коэффициент K тоже мал. В таких случаях говорят, что тело прозрачно для магнитного поля данной частоты. Компоненты индукционной системы, которые не должны нагреваться полем (такие как крепления и пр.), должны быть прозрачными или иметь очень низкое ρ

Если размеры нагреваемого тела или частота большие ($d/\delta > 10$), то коэффициент K всегда стремится к 1

Для цилиндров не существует максимума K и электрический КПД растет с частотой.
Для пластин существует небольшой максимум, когда толщина равна 3δ (более точно $\pi \delta$)



d – толщина пластины или диаметр цилиндра
 δ – глубина проникновения
 d/δ - “электрический размер” тела; он пропорционален корню квадратному из частоты

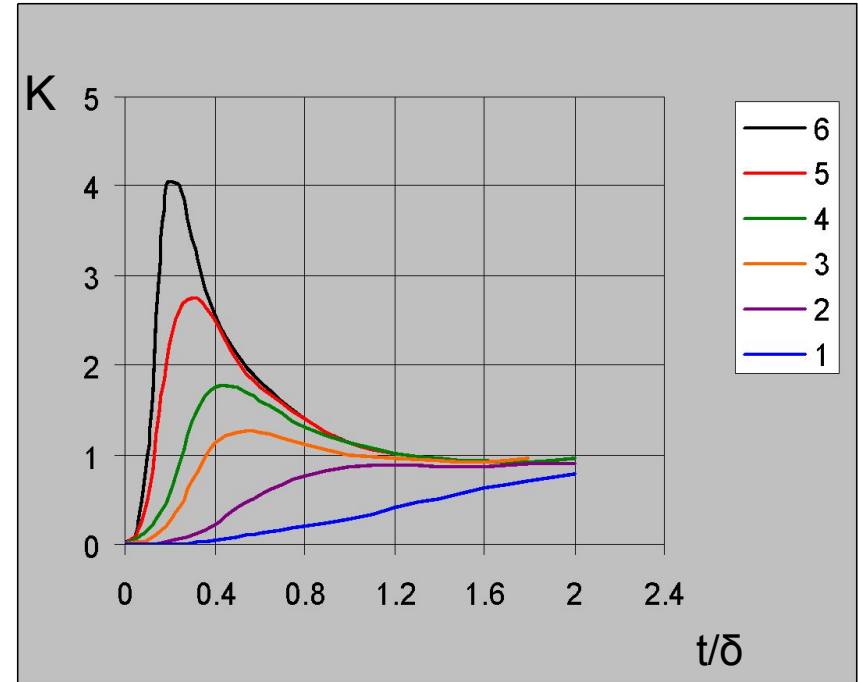
Коэффициент поглощения для труб

Для труб максимум коэффициента K может быть ярко выражен. Он выше для тонкостенных труб (соотношение t/d мало)

Желательно выбирать такие частоты, при которых коэффициент K близок к максимуму

Электрический размер трубы может быть characterized произведением t/δ и d/δ . Максимум эффективности индуктора при изменении частоты соответствует $td/\delta^2 = 3,5$

Учет конечной длины индуктора и нагреваемой трубы несколько повышает оптимальную частоту

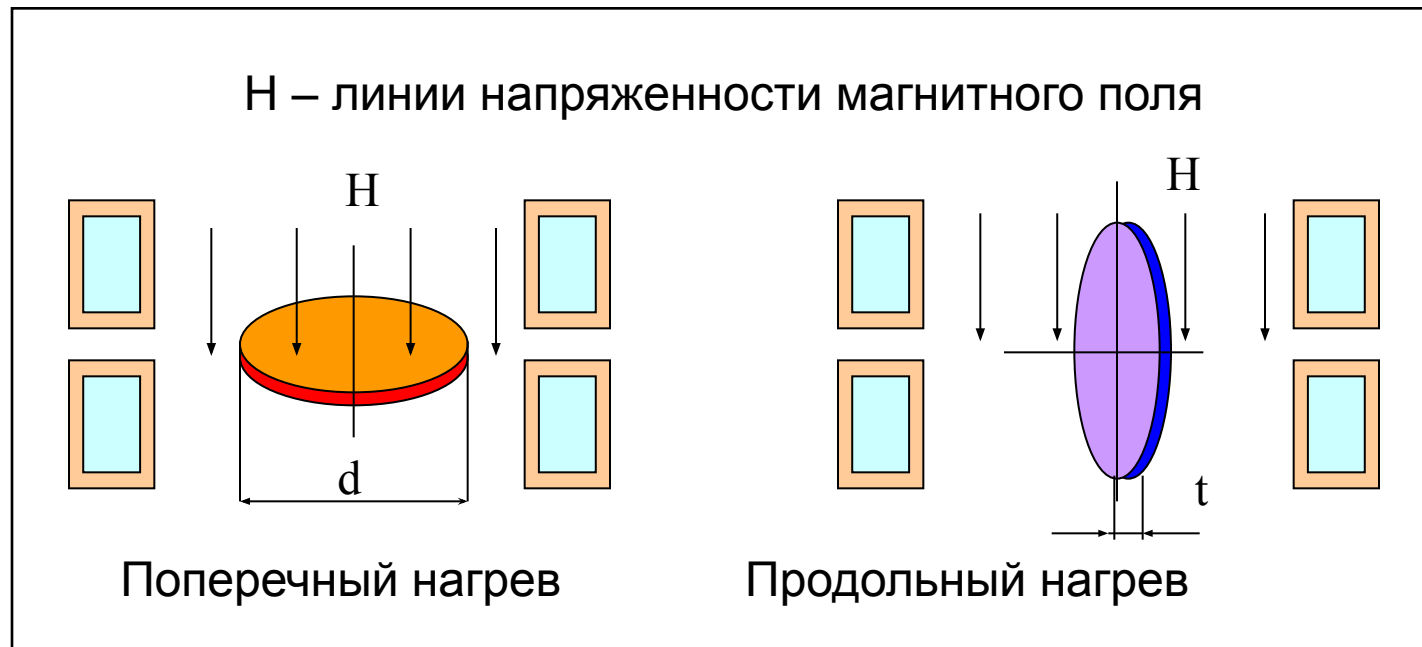


Коэффициент проводимости для труб
 t – толщина стенки трубы
 d – внешний диаметр трубы

Кривая	1	2	3	4	5	6
t/d	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01

Тонкая или толстая нагреваемая деталь ?

Поглощение мощности зависит также от ориентации нагреваемой детали в магнитном поле. Максимум поглощения происходит, когда поверхность детали перпендикулярна магнитным линиям



$d \gg \delta$ – Хороший нагрев $t < \delta$ – Плохой нагрев

Электромагнитные эффекты в индукционных системах

Сложные распределения магнитного поля, плотности тока и мощности, которые определяют распределение температуры в нагреваемом теле, могут быть описаны с помощью “Электромагнитных эффектов”:

- Поверхностный эффект (описан ранее)
- Эффект концентрации поля (эффект Фильда)
- Эффект близости
- Концевой эффект
- Краевой эффект для пластин и лент

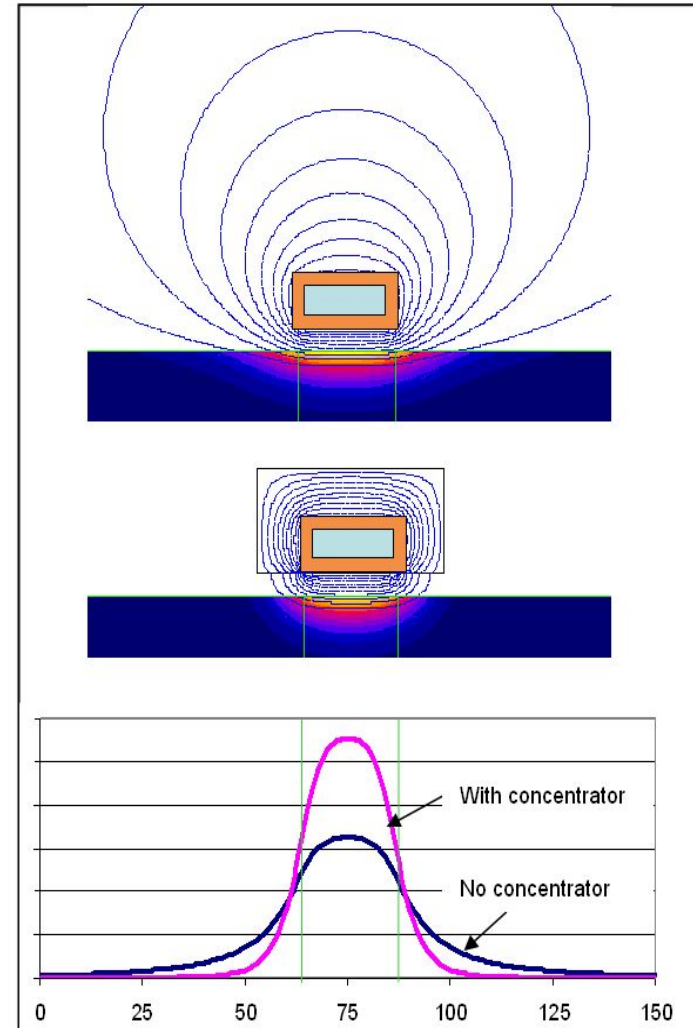
Эффект концентрации

Концентрация магнитного поля является частным случаем магнитного контроля, который включает также экранирование и перераспределение поля

Установка подковообразного концентратора на токопровод индуктора приводит к:

- Значительному уменьшению внешнего поля
- Увеличению мощности детали при том же токе индуктора или к снижению требуемого тока при той же мощности
- Уменьшению мощности, рассеиваемой за пределами зоны под индуктором

С другой стороны, использование концентратора вытесняет ток индуктора к поверхности, снижая поперечное сечение, по которому он протекает. Потери в индукторе возрастают. Когда концентратор выбран правильно, выгоды значительно преобладают над этим недостатком



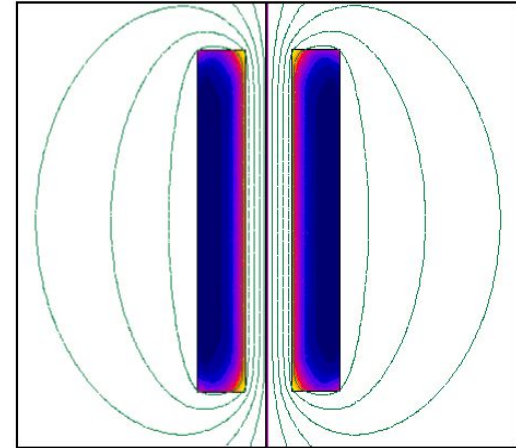
Распределение мощности на поверхности детали

Эффект близости в системе “индуктор-плоское тело”

Переменные токи противоположных направлений стремятся течь по соседним сторонам проводников. Этот эффект называется **Эффектом Близости**.

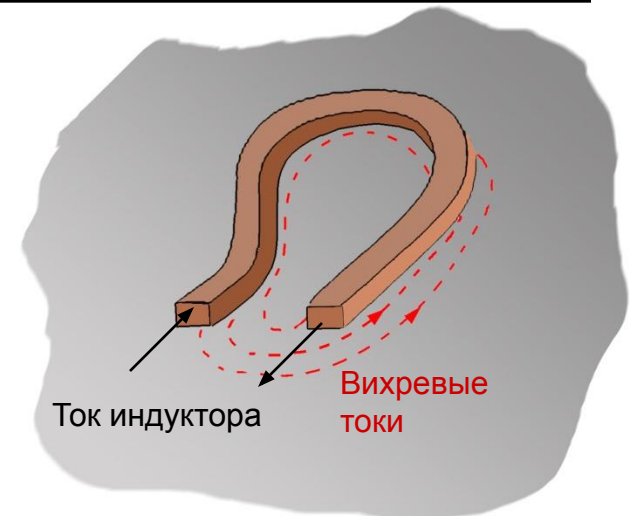
Наиболее ярко он проявляется при высоких частотах и малых зазорах.

В двухпроводном токопроводе токи противоположных направлений текут по сторонам, обращенным друг к другу (смотри картину распределения плотности тока и линий магнитного поля, программа Flux 2D)



Индуктор, расположенный над поверхностью нагреваемой детали, создает в ней вихревой ток, который течет под индуктором. Форма индуктора определяет конфигурацию нагреваемой области

Концентраторы значительно усиливают эффект близости и помогают контролировать контур нагрева



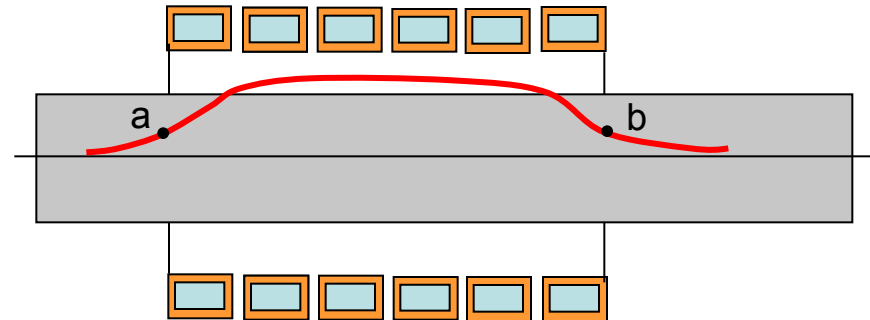
Концевые эффекты в цилиндрических системах

Концевые эффекты возникают вследствие искажения линий магнитного поля в зонах нарушения регулярности системы. Они могут быть вызваны конечной длиной индуктора (**Концевой эффект индуктора**) или детали (**Концевой эффект детали**). Вследствие концевого эффекта мощность в нагреваемом образце постепенно падает к концам индуктора.

Можно показать, что плотность мощности у концов индуктора (точки **a** и **b**) в четыре раза меньше, чем в регулярной части.

Использование концентраторов может сделать распределение мощности более близким к прямоугольному, увеличивая зону равномерного нагрева.

Сгущение витков индуктора у его концов также изменяет распределение мощности, компенсируя концевой эффект.



Пример распределения мощности при нагреве длинного немагнитного цилиндра

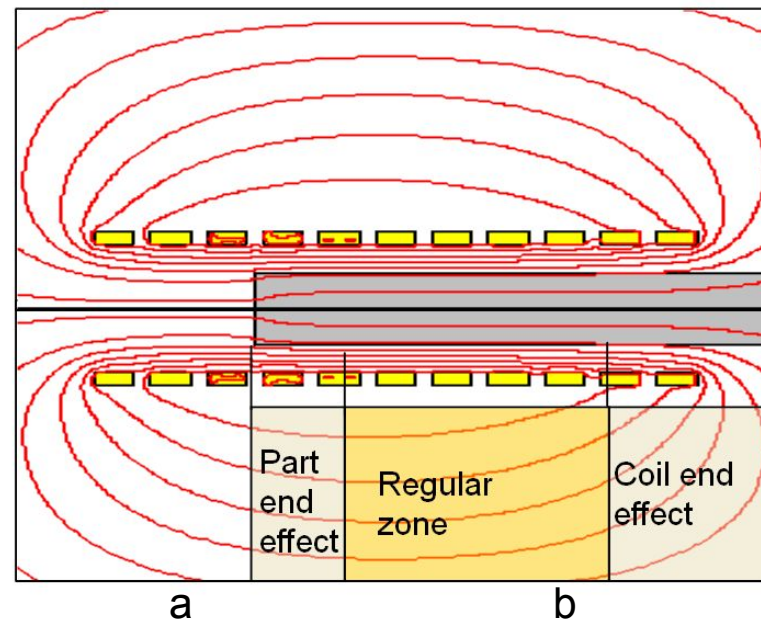
Концевые эффекты в цилиндрических системах с немагнитными телами

Концевой эффект детали обусловлен искажением магнитного поля на ее концах. У конца **немагнитного** тела линии магнитного поля срезают угол, стремясь проходить по большему сечению

Вследствие этого увеличивается магнитный поток, пересекающий торцевую плоскость, что приводит к локальному увеличению мощности (положительный концевой эффект). Для немагнитных тел концевой эффект всегда положительный. Степень увеличения мощности возрастает с частотой, но при этом уменьшается длина зоны концевого эффекта

Положительный концевой эффект детали может быть компенсирован концевым эффектом индуктора (выбором заглубления детали в индуктор)

Когда это невозможно, например при нагреве деталей разной длины в одном индукторе, могут использоваться насадки из меди или алюминия



Линии магнитного поля для индуктора с немагнитной нагреваемой деталью (вверху)

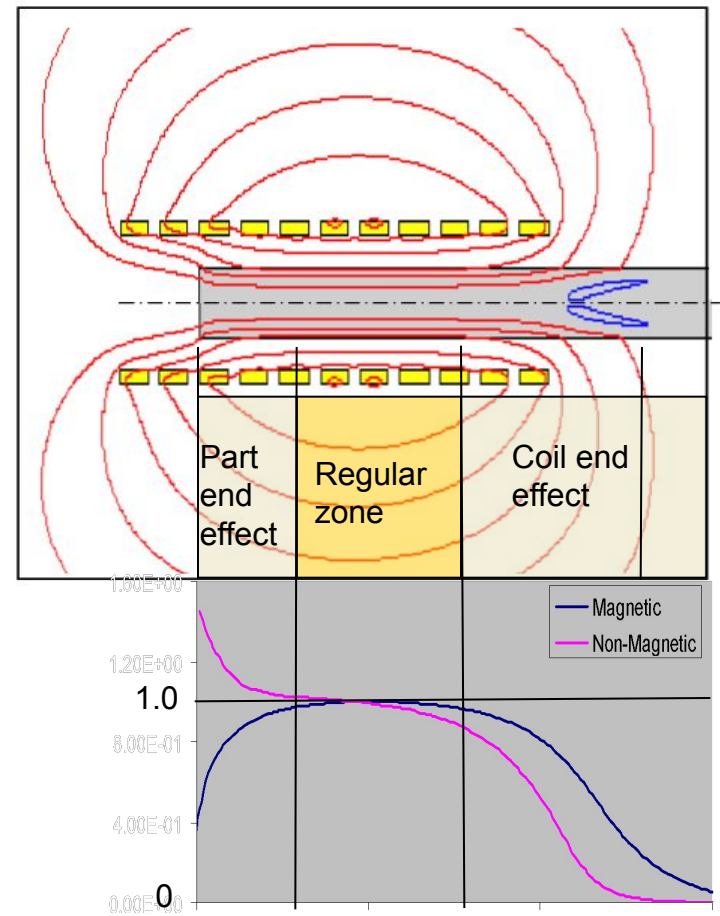
a – зона концевого эффекта детали

b – зона концевого эффекта индуктора

Flux 2D program

Концевые эффекты в цилиндрических системах с магнитными телами

Линии магнитной индукции при нагреве магнитного тела на низкой частоте показаны на рисунке. Часть магнитных линий не доходит до конца детали (отрицательный концевой эффект). Длина недогретой концевой зоны примерно равна диаметру нагреваемой детали. С повышением частоты степень отрицательного концевого эффекта уменьшается и он даже может стать положительным. Отрицательный концевой эффект **не может** компенсироваться заглублением и требуется сгущение витков или иные средства пространственного управления. Распределение мощности и температуры может меняться в процессе нагрева. Например, температура конца детали может быть ниже, чем в регулярной зоне, когда деталь магнитная. При температуре выше точки Кюри деталь становится немагнитной и температура концевой зоны может быстро достичь или даже превзойти температуру регулярной зоны.



Распределение мощности вследствие концевого эффекта индуктора и нагреваемой детали: магнитной при 60 Гц — и немагнитной при 3 кГц —

Концевые и краевые эффекты при нагреве тел прямоугольного сечения

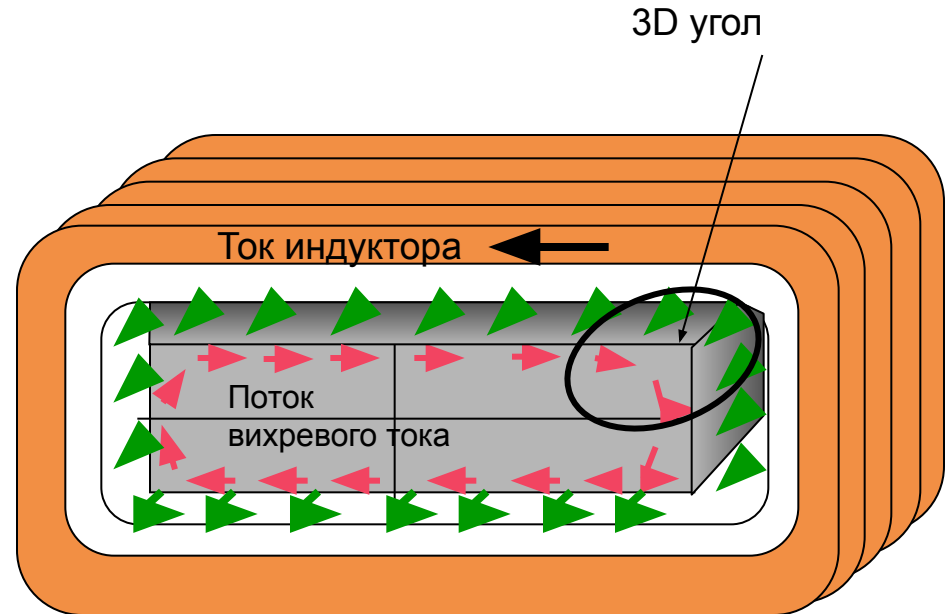
Нагрев прямоугольных тел (слябов, полос) является трехмерной проблемой

Если толщина сляба значительно меньше, чем ширина и длина, нагрев центральной зоны можно считать одномерной задачей

На боковых сторонах тела вихревой ток поворачивается на 180 градусов, формируя зоны **краевого эффекта**

На концах сляба возникает деформация магнитного поля, которое стремится "срезать" угол. Это зона **концевого эффекта**, подобного концевому эффекту цилиндра

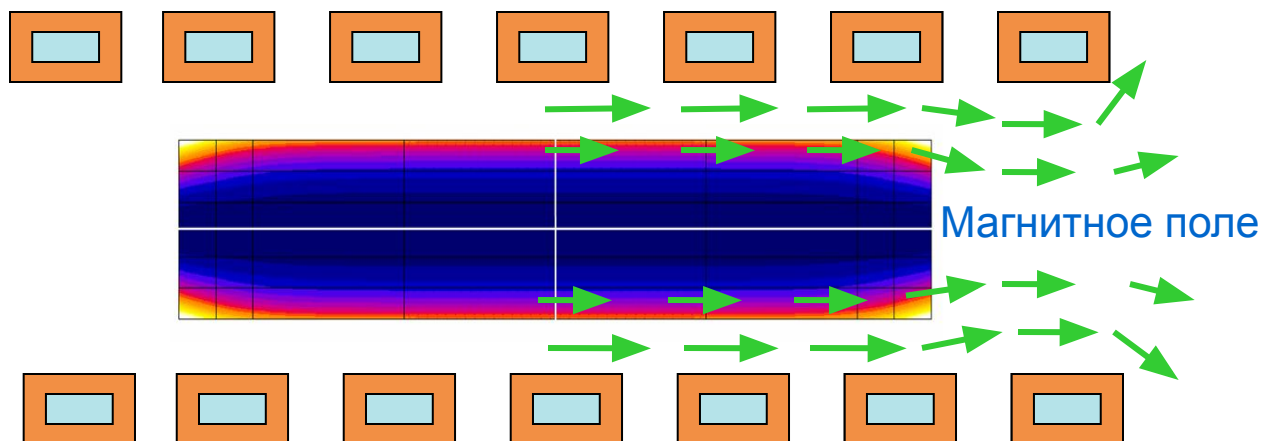
3D углы являются 3х мерными зонами, где концевой и краевой эффекты накладываются друг на друга



Нагрев сляба в многовитковом овальном индукторе

Концевые эффекты в немагнитном прямоугольном теле

Распределение мощности по длине сляба из нержавеющей стали, частота 9,5 кГц



Концевой эффект в немагнитном теле положителен, то есть в концах тела всегда имеется дополнительная мощность.

Распределение мощности и температуры вдоль сляба может контролироваться его положением внутри индуктора, изменением плотности намотки индуктора или с помощью магнитных концентраторов

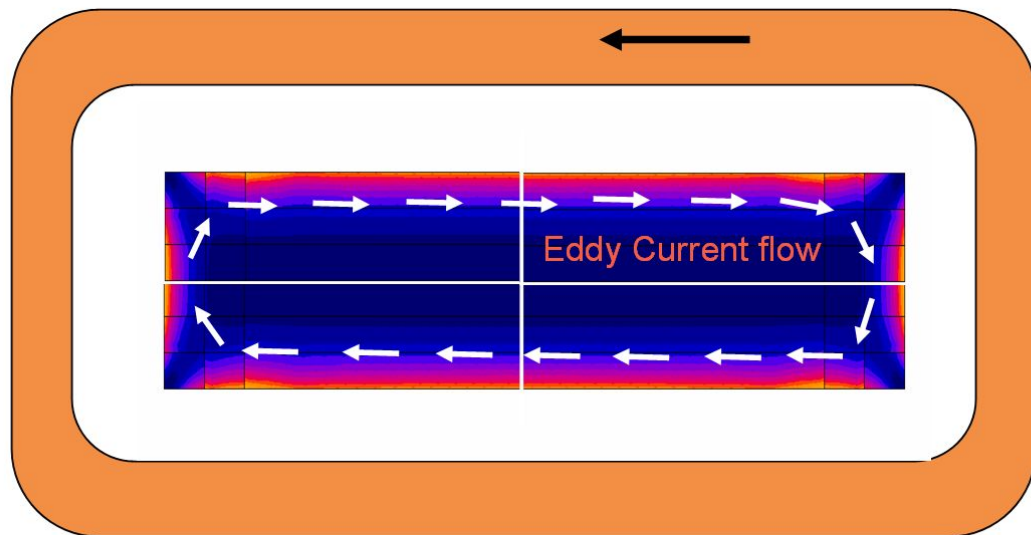
Краевые эффекты в магнитном и немагнитном слябе

Краевой эффект в прямоугольных телах может вызвать как недогрев, так и перегрев в кромках

Недогрев происходит, когда толщина сляба меньше, чем 3 глубины проникновения

Перегрев – когда толщина больше, чем 3 (точнее π) глубин проникновения, что типично для магнитных или алюминиевых слябов

Правильный выбор частоты чрезвычайно важен для равномерного нагрева сляба по ширине



Распределение мощности в поперечном сечении сляба из нержавеющей стали. Частота 9,5 кГц

Программа Flux 3D

Распределение мощности в немагнитном слябе (трехмерный угол)

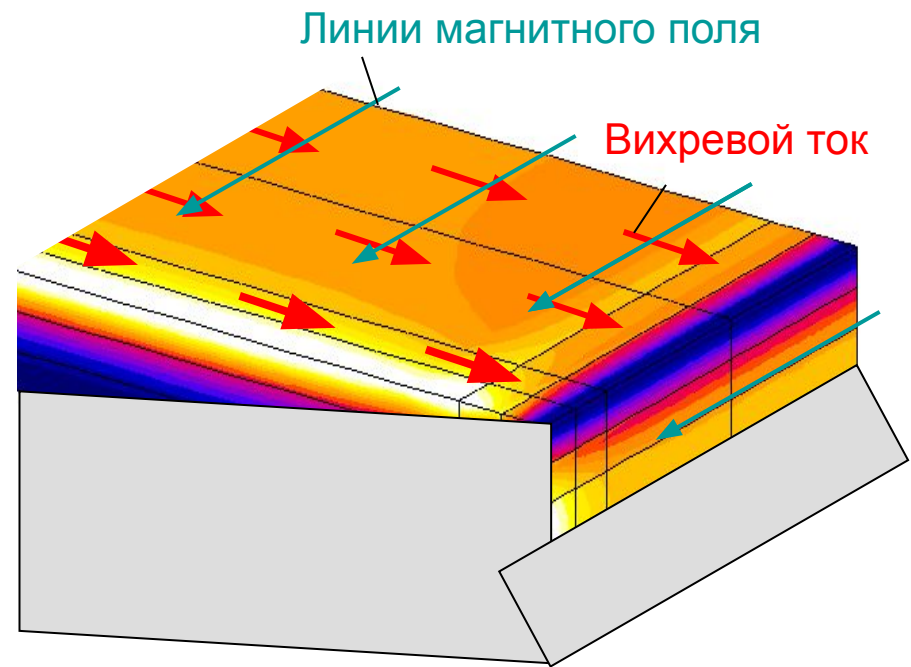
Частота 9.5 кГц

В угловой зоне происходит наложение **Концевого** и **Краевого** эффектов

Показана приблизительно 1/8 всего сляба

3D эффект на углах сляба является сложным процессом

Для равномерного нагрева всего сляба необходимо учитывать как краевые и концевые эффекты, так и условия теплоотдачи, которые могут быть разными на различных участках поверхности



Программа Flux 3D



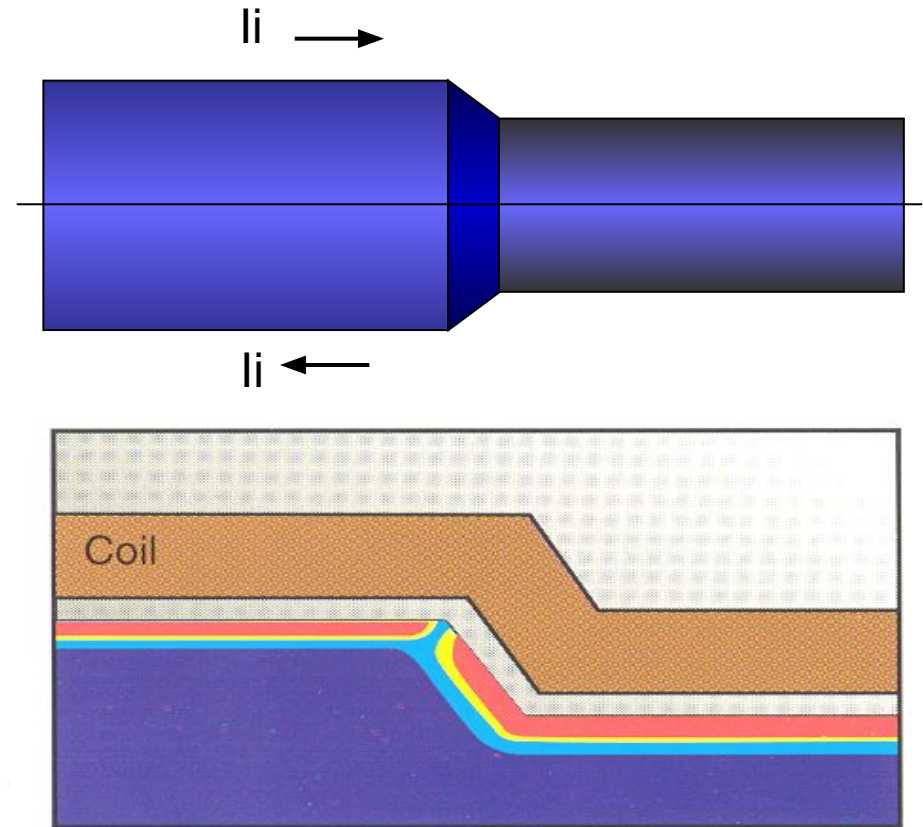
Нагрев цилиндра с переменным диаметром – Петлевой индуктор

Петлевые индукторы часто используются при одновременном нагреве тел переменного сечения

Индуктированный ток течёт вдоль оси детали, что обеспечивает интенсивный нагрев зона внутреннего угла

Мощность на внешнем угле понижена

Такое распределение мощности благоприятно для обеспечения нагрева равномерного слоя



Цветовая карта удельной мощности при нагреве петлевым индуктором

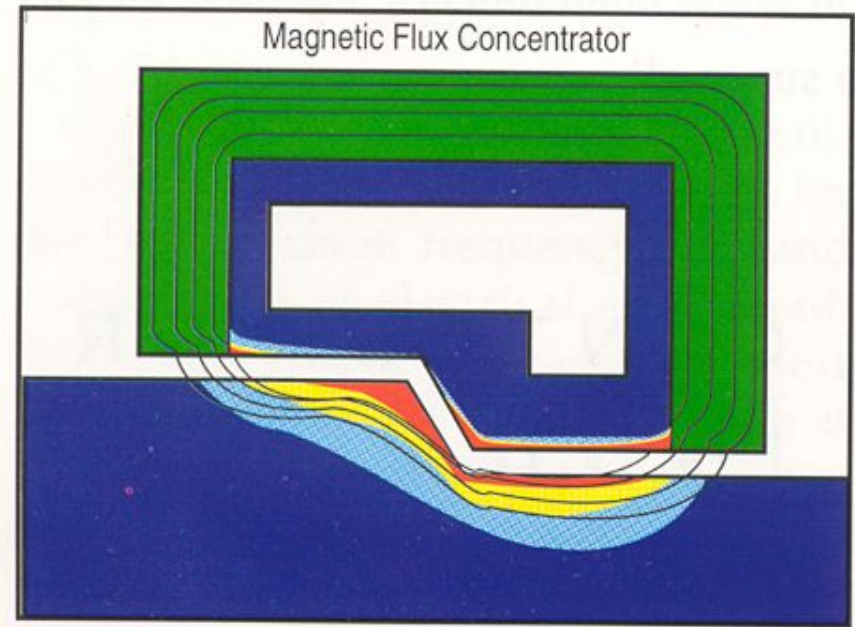
Нагрев цилиндра с переменным диаметром – Цилиндрический индуктор

Цилиндрические индукторы часто используются при локальном одновременном нагреве тел переменного сечения или при сканировании

Магнитное поле сильнее «сцеплено» с внешним углом, что приводит к его перегреву

Зона внутреннего угла недогревается из-за пониженной мощности и более сильного теплоотвода

Сильное профилирование индуктора необходимо для равномерного нагрева



Линии магнитного поля и Цветовая карта удельной мощности при нагреве профилированным круговым индуктором