



БашГАУ

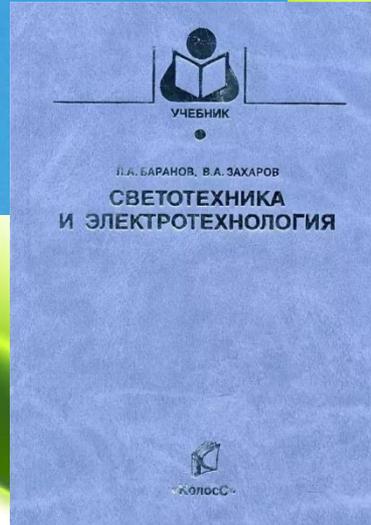
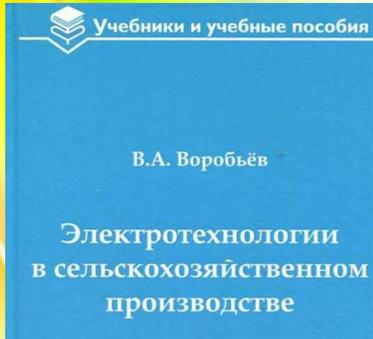
*Башкирский государственный
аграрный университет*

Светотехника и электротехнология

Индукционный нагрев

Нагрев СВЧ

Рекомендуемые источники:



1. Баранов, Л. А. Светотехника и электротехнология: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" / Л. А. Баранов, В. А. Захаров ; Международная ассоциация "Агрообразование". - М. : КолосС, 2006. - 343 с.

2. Жаворонков Н.А. Электротехника и электроника: учебное пособие для студ. социальных вузов, технических отделений гуманитарных вузов и вузов неэлектротехнического профиля : рек. УМО по образованию / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. - 4-е изд., испр. - М. : Издательский центр "Академия", 2011. - 395 с.

3. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник для студ. вузов обуч. по спец. 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" : допущено УМО вузов / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов. - М. : КолосС, 2008. - 655 с.

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 микрообъемов (доменов), которые поворачиваются под воздействием внешнего магнитного поля

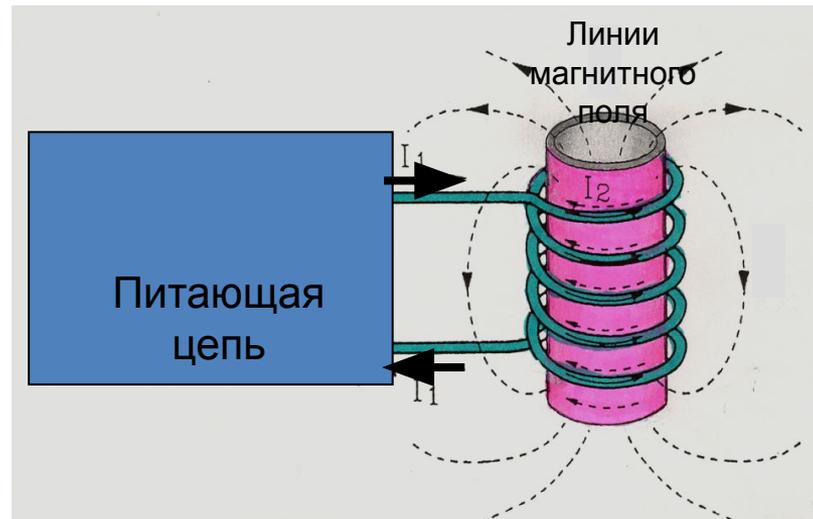
* Существует также особый вид Индукционного нагрева, при котором нагреваемое тело быстро движется/вращается в сильном **ПОСТОЯННОМ** магнитном поле. Этот вид нагрева называется Нагрев Индукцией Движения.

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).

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



В каждом индукционном устройстве существует три замкнутых цепи:

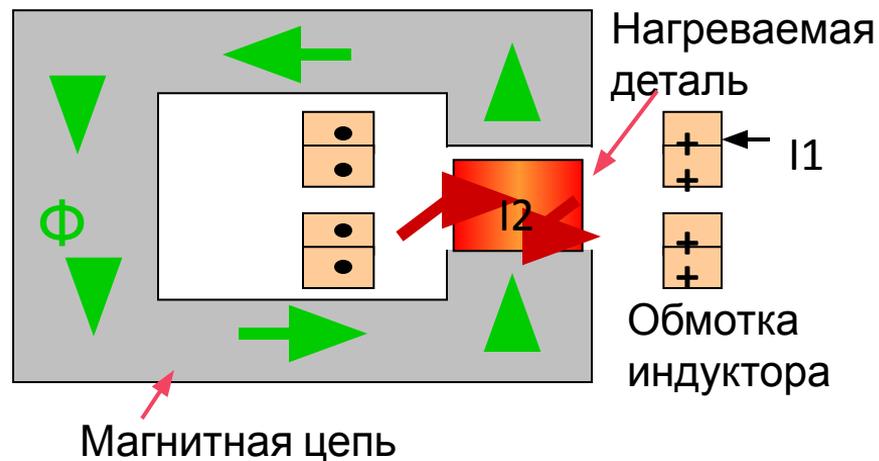
Цепь тока индуктора (I_1)

Цепь магнитного потока (Φ)

Цепь вихревого тока (I_2)

Цепь магнитного потока может быть в виде магнитного сердечника, как у индуктора трансформаторного типа (рис.) 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

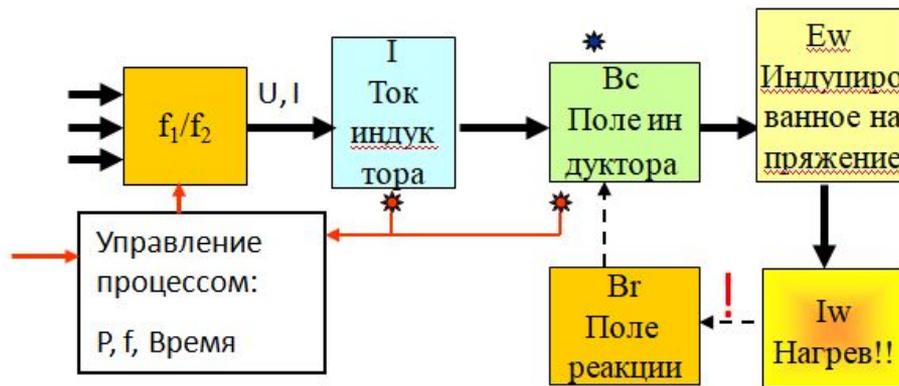


f_1/f_2 – преобразователь частоты (источник)

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

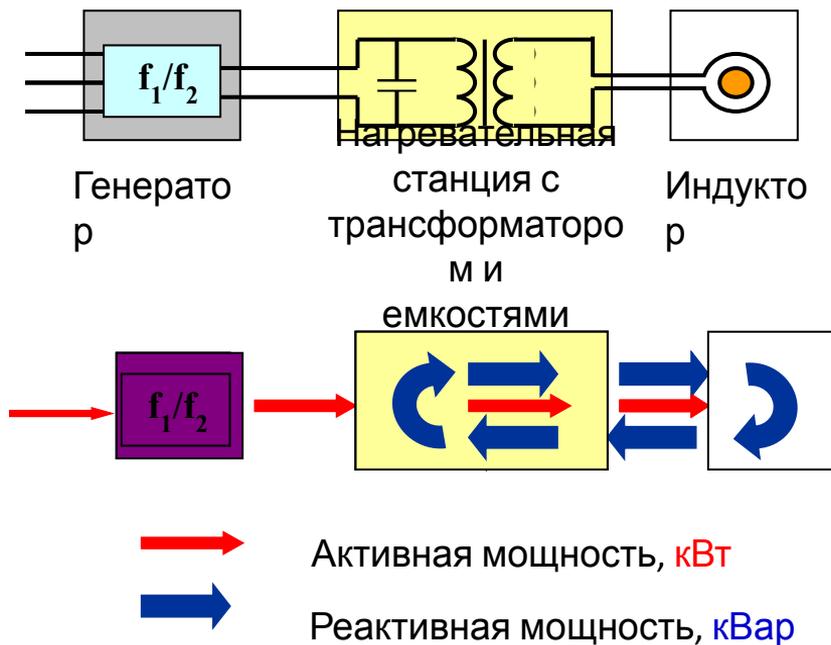


- * Зона контроля магнитного потока
- * Точки сигналов обратной связи, которые могут быть использованы в замкнутой цепи управления и для мониторинга

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.

Можно 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



Глубина проникновения – основная величина в теории и практике индукционного нагрева

Обычно **глубину проникновения** связывают с утверждением, что магнитное поле проникает на указанную глубину от поверхности и весь нагрев происходит внутри этого слоя.

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**, которая пропорциональна корню квадратному из удельного сопротивления материала ρ и обратно пропорциональна корню квадратному из относительной магнитной проницаемости μ и частоты.

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

Коэффициент k зависит от выбранной системы единиц

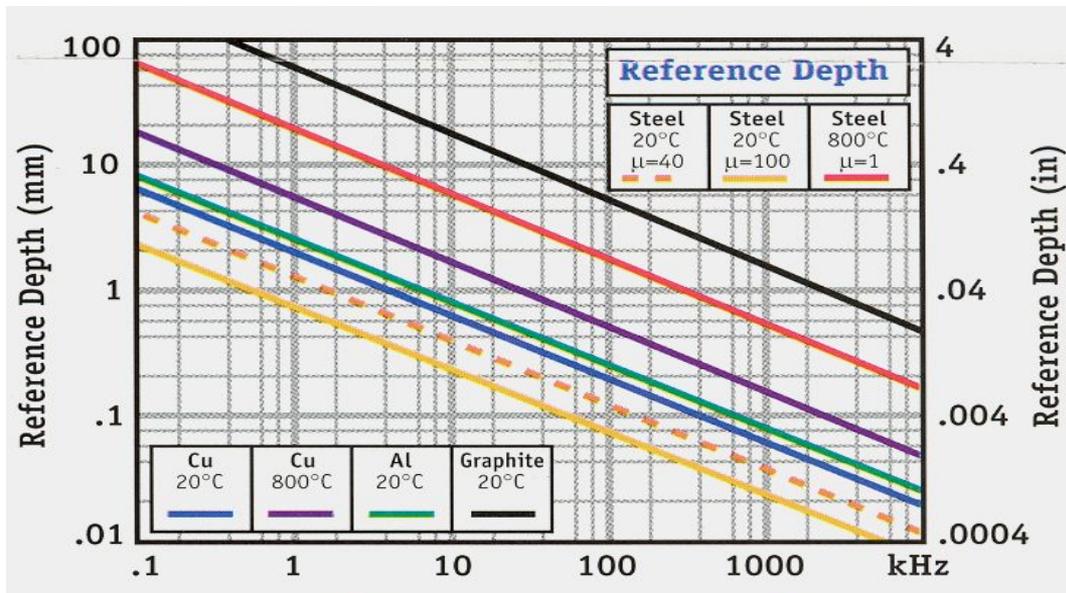
Система	ρ	f	δ	k
Метри- ческая	мкОмсм	кГц	мм	1.6

Примеры распределения мощности в цилиндрических телах

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



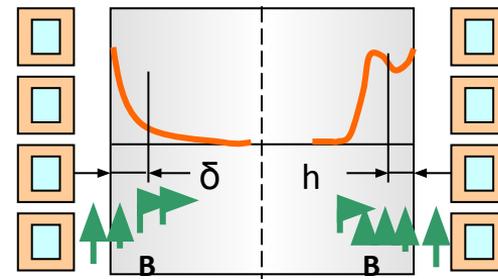
Обычно используется логарифмическая шкала для частоты и δ в широком диапазоне

Существуют сложные аналитические формулы для распределения тока и мощности в цилиндрах, однако они достаточно точны только для однородных тел. В настоящее время используются методы Компьютерного моделирования, которые дают 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

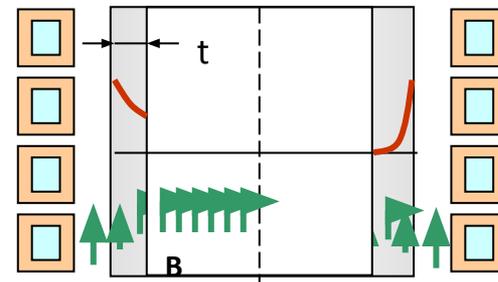
Справа – магнитная сталь в конце закалки, когда внешний слой потерял магнитные свойства; h – аустенизированный слой, который будет закален после охлаждения



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



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

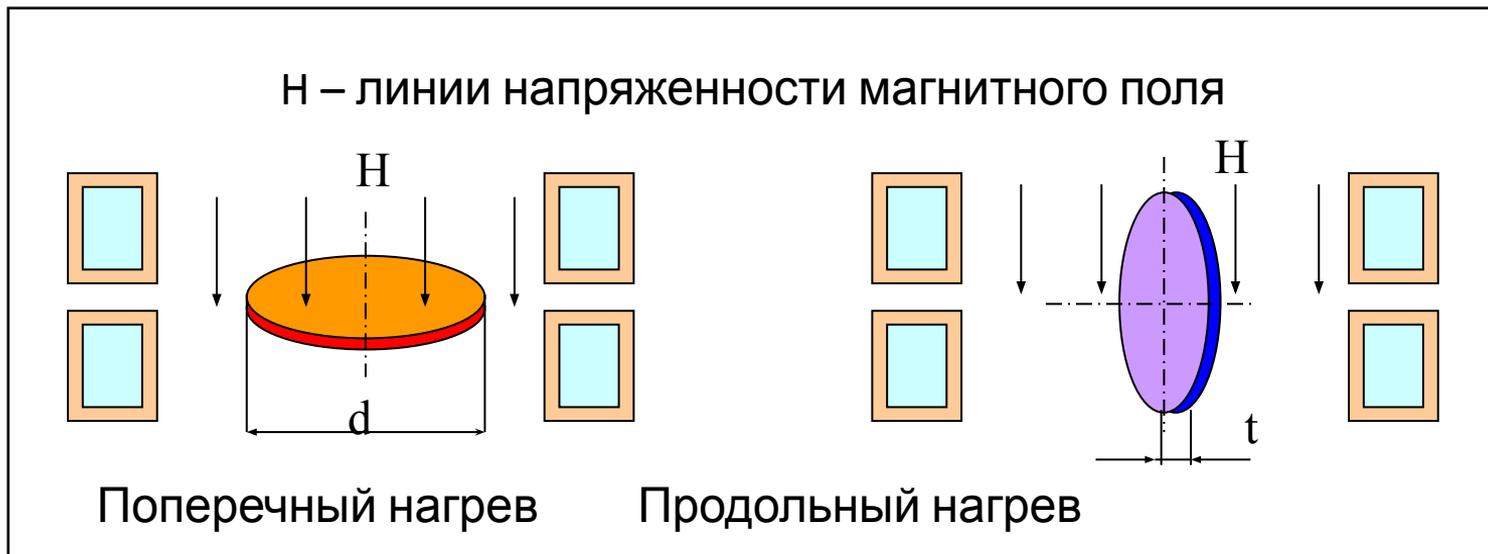
δ – глубина проникновения

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

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

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

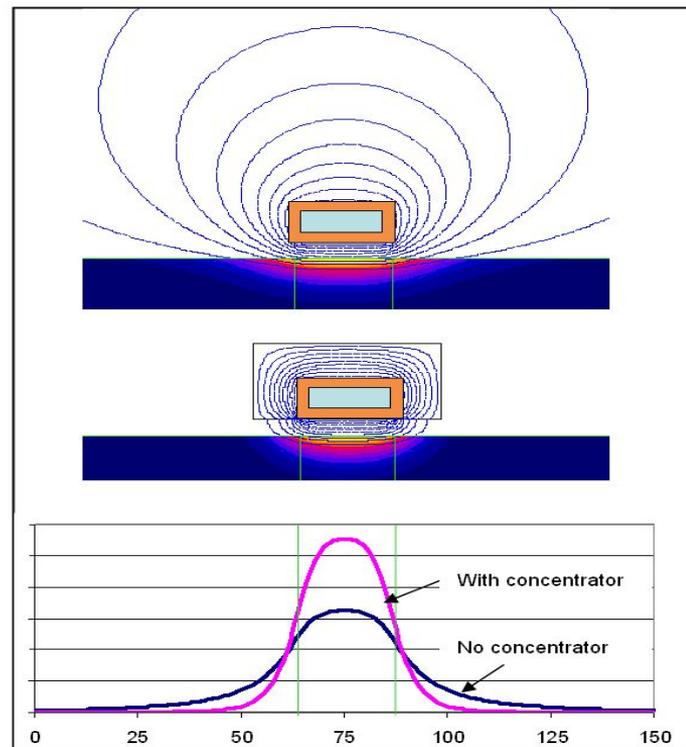
- **Эффект концентрации поля** (эффект Фильда)
- **Эффект близости**
- **Концевой эффект**
- **Краевой эффект** для пластин и лент

Концентрация магнитного поля является частным случаем магнитного контроля

Установка подковообразного концентратора на токопровод индуктора приводит к:

- Значительному уменьшению внешнего поля
- К снижению требуемого тока при той же мощности
- Уменьшению мощности, рассеивающейся за пределами зоны под индуктором

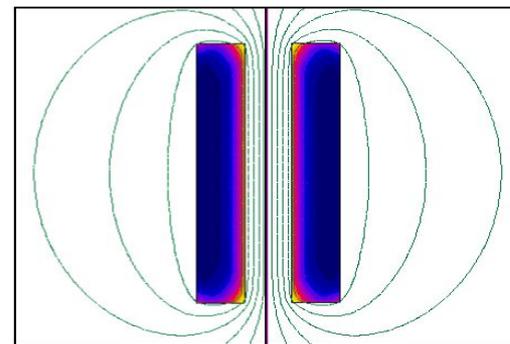
С другой стороны, использование концентратора вытесняет ток индуктора к поверхности, снижая поперечное сечение, по которому он протекает. Потери в индукторе возрастают. Когда концентратор выбран правильно, выгоды значительно преобладают над этим недостатком



Распределение мощности на поверхности

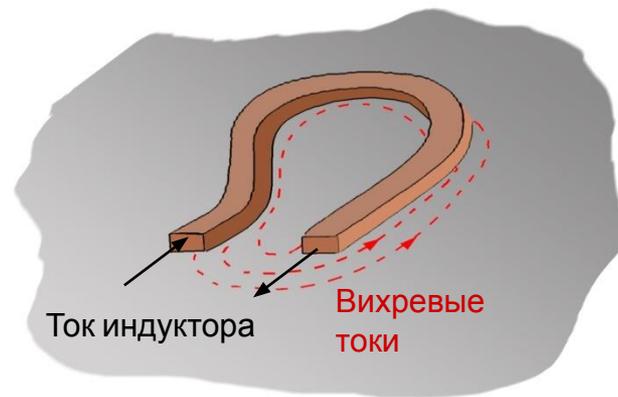
Переменные токи противоположных направлений стремятся течь по соседним сторонам проводников. Этот эффект называется **Эффектом Близости**. Наиболее ярко он проявляется при высоких частотах и малых зазорах.

В двухпроводном токопроводе токи противоположных направлений текут по сторонам, обращенным друг к другу



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



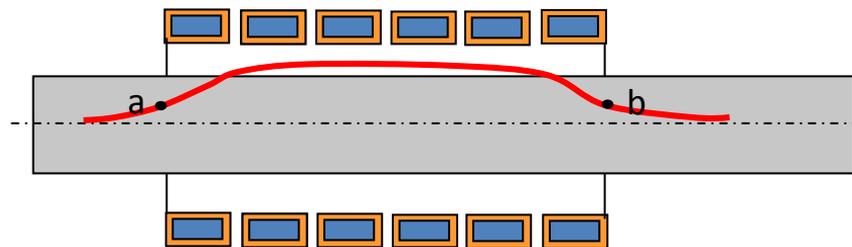
Распределение мощности на поверхности

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.

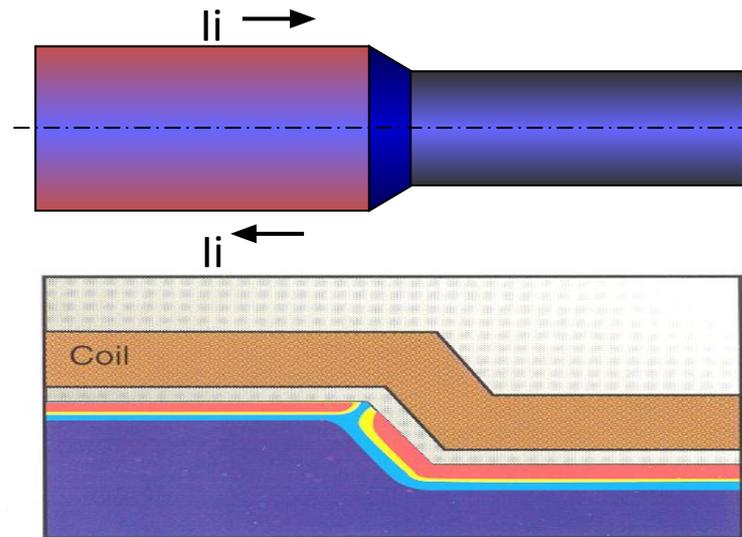


Пример распределения мощности при нагреве длинного немагнитного цилиндра

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 индуктором

Микроволновое излучение- это электромагнитные волны длиной от 1 мм -1 м, которые используются не только в микроволновых печах, но и в радиолокации, радионавигации и им подобных приборах.



**Более 70 лет назад,
американский
инженер Перси Спенсер впервые
заметил способность
сверхвысокочастотного
излучения к нагреванию
продуктов и запатентовал
микроволновую печь. ****



СВЧ-нагрев широко применяется в медицине, микробиологии для уничтожения жизнедеятельности микроорганизмов и грибов.

Его используют для пастеризации молока, хлебобулочных и кондитерских изделий, для уничтожения неспорных бактерий.

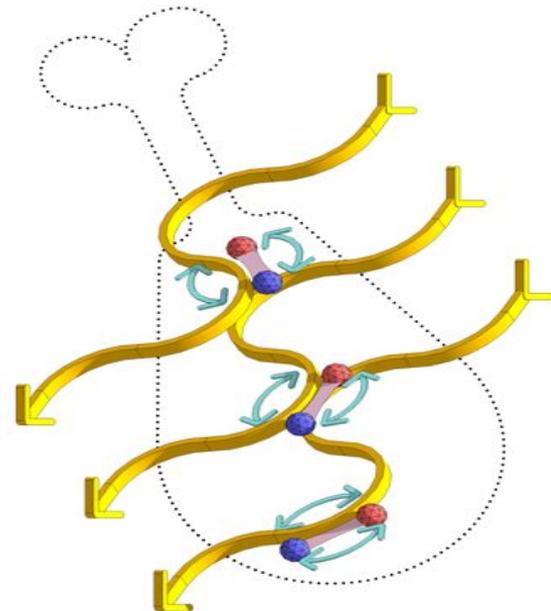
СВЧ-нагрев широко применяют для дезинфекции — уничтожения бабочек, жуков, личинок и яиц насекомых в таких пищевых продуктах как мука, крупа, пшеница, рис, чай и др.

СВЧ-нагрев применяют и для терапевтических воздействий на внутренние органы и ткани человеческого тела, к которым трудно или невозможно подвести теплоту, нагревая поверхность тела. При нагреве в организме происходят различные биохимические реакции: расширяются сосуды, повышается капиллярное давление, увеличивается проницаемость клеточных мембран, возрастает обмен веществ, ускоряется процесс заживления ран.

С помощью СВЧ-нагрева производят варку, дефростацию (размораживание) и

В электрическом поле молекулы выстраиваются строго по направлению силовых линий, "+" в одну сторону, "-" в другую. Если поле поменяет направление, то молекулы тут же переворачиваются на 180° , а поле волны, меняет полярность 4 млрд. 900 млн. раз в секунду!

Молекулы поворачиваются с бешеной частотой и трутся одна о другую, от этого трения выделяется тепло, которое служит причиной разогрева пищи.



1. В СВЧ печах используется излучение, которое не оказывает вредного влияния, на продукты питания.
2. Благодаря микроволновкам снизилось заболевание раком желудка, так как в пищу не добавляется масло.



3. СВЧ в 2 раза лучше сохраняют витамины и минералы в пище, из-за малого промежутка времени. При приготовлении еды на плите разрушается до 60 % витамина С, а под воздействием микроволн - всего от 2 до 25%.

Недостатки СВЧ-нагрева: низкий КПД, высокая стоимость и сложность оборудования; возможность утечки СВЧ-поля и связанная с этим опасность вредного воздействия его на обслуживающий персонал.

Технология тепловой обработки пищевых продуктов и СВЧ- аппаратах требует соблюдения ряда требований. Так, продукт нельзя помещать в СВЧ-поле в металлической посуде, так как металл отражает электромагнитное поле данной частоты. Размеры и масса обрабатываемых продуктов должны быть строго определенными и соответствовать мощности и рабочей частоте поля аппарата.

